

УДК 621.1+629.063.2

## **Влияния неравномерности поля скоростей воздушного потока по фронту пористых объектов на их аэродинамическое сопротивление**

**Петров А.П.**

*Курганский государственный университет, ул. Гоголя, 25, Курган, 640669, Россия*

*e:mail:alex\_p2@mail.ru*

### **Аннотация**

Изучена физическая природа влияния неравномерности поля скоростей воздушного потока по фронту пористых объектов на их аэродинамическое сопротивление. Определены основные факторы вызывающие увеличение аэродинамического сопротивления пористых объектов. Исследовано влияние пористых объектов на распределение потока воздуха по фронтальному сечению. В качестве объекта исследования был использован радиатор. Представлены результаты расчетов численного моделирования гидродинамических процессов.

**Ключевые слова:** неравномерное распределение скоростей воздуха, пористый объект, радиатор, аэродинамическое сопротивление

### **Введение**

Проницаемые объекты, такие как радиаторы, сетки, решетки и т.д., установленные в воздушной магистрали, могут иметь большее аэродинамическое

сопротивление, чем их сопротивление в идеальных лабораторных условиях. Это происходит тогда, когда через такой объект протекает поток воздуха, имеющий неравномерное распределение скорости по фронту. В этом случае аэродинамическое сопротивление проницаемого объекта будет иное, по сравнению с равномерным потоком при том же расходе воздуха.

Такое явление обусловлено двумя факторами: тем, что аэродинамическая характеристика проницаемых объектов (зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta$  от скорости воздуха  $V$ , проходящего через объект) нелинейная, и тем, что падение давления  $\Delta P$  на таком объекте также имеет нелинейный характер.

Существует несколько проблем связанных с неравномерным распределением скорости воздуха. Например, снижение теплоотдачи радиатора вследствие неравномерного распределения скорости воздуха. Данная проблема достаточно хорошо изучена и представлена во многих работах [1, 2 и 3]. Что нельзя сказать об исследованиях касающихся влияния пористых объектов на распределение воздушного потока по фронтальному сечению, где рассматривались лишь частные случаи использования пористых объектов для выравнивания поля скоростей воздуха или результаты воздействия таких объектов на поле [4, 5 и 6]. В этих исследованиях вопрос о механизме взаимодействия пористого объекта с воздушным потоком не рассматривался, и считалось, что аэродинамическое сопротивление пористого объекта под воздействием неравномерного поля остается

ся неизменным. То есть фактически изменение сопротивления пористого объекта относили на элементы расположенные рядом с ним. В работе [7] рассматривается теоретическая предпосылка о влиянии неравномерности поля скоростей на изменение аэродинамического сопротивления радиатора под воздействием неравномерного поля скоростей по фронту.

Поэтому целью данной работы было установление природы этого явления и определение факторов влияющих на увеличение аэродинамическое сопротивление пористых объектов.

### **Природа исследуемого явления**

В качестве примера пористого объекта рассмотрим радиатор. Практически все радиаторы имеют зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости в виде степенной функции

$$\zeta = a \cdot V^{-n}.$$

Коэффициент  $a$  определяет положение графика аэродинамической характеристики по высоте, показатель степени  $n$  определяет степень кривизны линии графика характеристики. На рис. 1 представлено несколько таких графиков, которые имеют разные коэффициенты  $a$  и показатели степени  $n$ . Как видно, чем больше показатель степени, тем больше кривизна линий. Если показатель степени 0, график имеет прямую горизонтальную линию. При показателе степени, равном 1, график имеет наибольшее искривление.

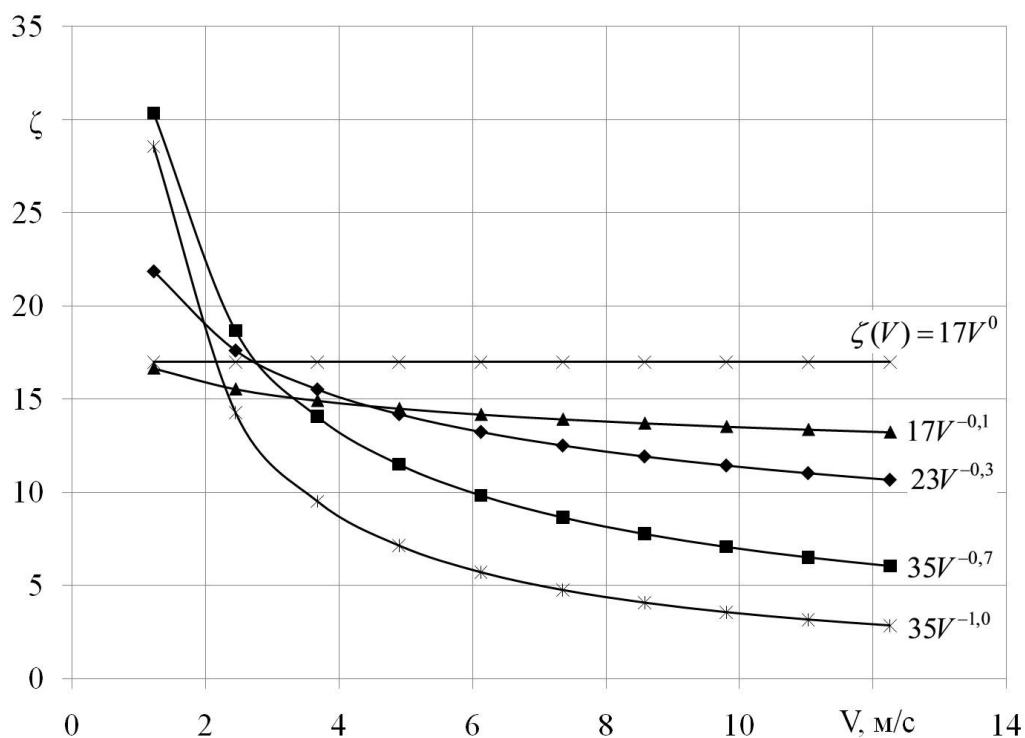


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости воздуха

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления радиатора  $\zeta$  от скорости воздуха характеризует аэродинамические свойства его сердцевин. Вторым фактором, влияющим на рассматриваемый процесс, является зависимость потери давления на радиаторе как местном сопротивлении  $\Delta P$  (аэродинамическое сопротивление). Аэродинамическое сопротивление радиатора определяется по формуле

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho V^2}{2}. \quad (1)$$

В диапазоне изменения  $n$  от 0 до 1 оба фактора имеют взаимно противоположное влияние на процесс изменения аэродинамического сопротивления радиатора при прохождении через него потока воздуха с неравномерно распре-

деленной скоростью по фронту. Причина влияния второго фактора заключается в том, что в формуле (1) скорость  $V$  имеет показатель степени 2, т.е. зависимость также нелинейная относительно  $V$ .

По мере увеличения  $n$  графики  $\zeta(V)$  (рис. 1) увеличивают кривизну, а графики  $\Delta P(V)$  (рис. 2) выпрямляются. При  $\zeta = 35V^{-1,0}$  график на рис. 1 имеет наибольшую нелинейность, а на рис. 2 график имеет линейную характеристику. Такая взаимосвязь между представленными факторами объясняется тем, что

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho V^2}{2} = aV^{-n} \frac{\rho V^2}{2} = a \frac{\rho V^{2-n}}{2}.$$

Если показатель степени  $n=1$ , то показатель степени у  $V$  в последнем выраже-

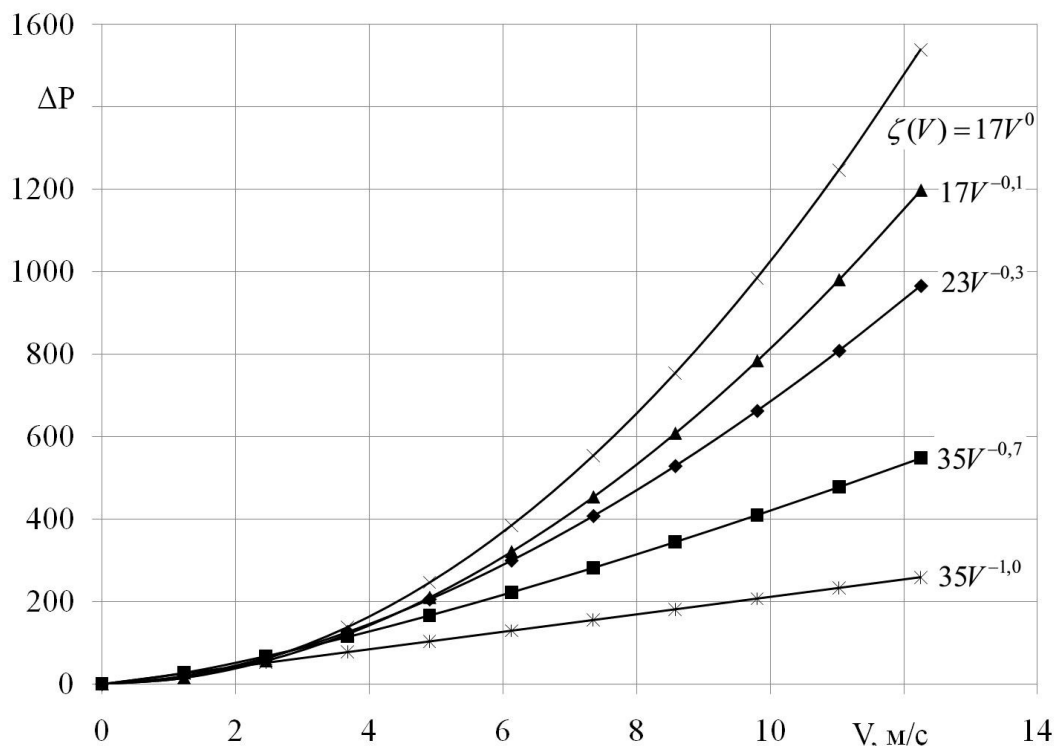


Рис. 2. Зависимость падения давления на радиаторе от скорости воздуха

нии будет равен 1, т.е. зависимость становится линейной.

Для иллюстрации влияния неравномерности поля скоростей на аэродинамическое сопротивление радиатора предположим, что в одном случае поток воздуха, протекая через радиатор, имеет два уровня скорости на одной половине радиатора  $V_1$  и на второй -  $V_2$ , а во втором случае через радиатор проходит равномерный поток с тем же расходом, а значит, имеет скорость  $V_0 = (V_1 + V_2)/2$ . В первом случае аэродинамическое сопротивление одной и другой половины радиатора будет равно  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$ , а во втором случае аэродинамическое сопротивление обеих частей радиатора равны  $\Delta P_0$  (рис. 3).

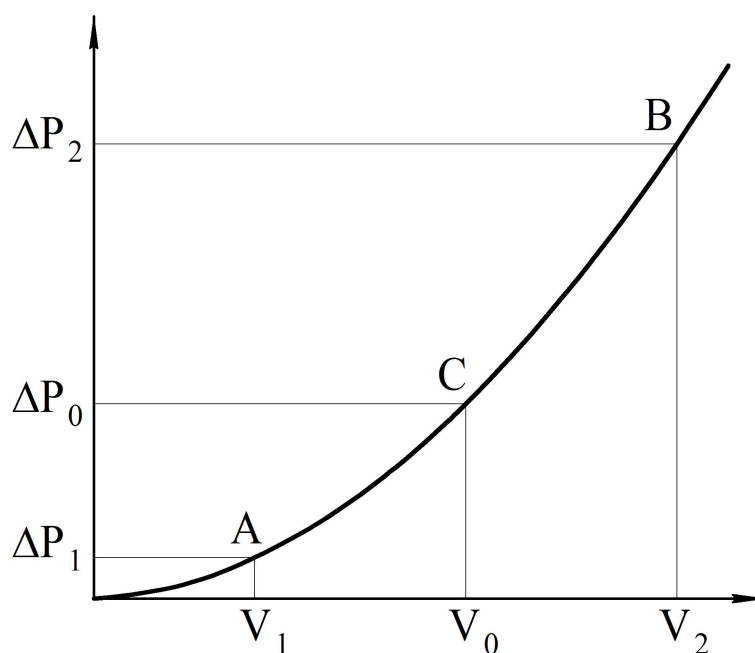


Рис. 3. Зависимость аэродинамического сопротивления радиатора от скорости воздуха

Падение давления на радиаторе в первом и во втором случае не будут равны между собой, поскольку  $\Delta P_1 + \Delta P_2 > 2\Delta P_0$ . На основании вышеизложенного

можно сделать заключение, что аэродинамическое сопротивление радиатора увеличивается из-за неравномерного распределения скорости воздуха по его фронтальной поверхности. Вследствие нелинейности аэродинамической характеристики, те участки радиатора, где скорость воздуха ниже средней скорости (а значит, эти участки радиатора оказывают меньше аэродинамическое сопротивление, не могут компенсировать повышенное сопротивление участков), где скорость выше средней.

Степень изменения аэродинамического сопротивления радиатора зависит от двух факторов: от величины неравномерности воздушного потока и аэродинамической характеристики самого радиатора (полученной при равномерном потоке). Чем более неравномерно распределена скорость воздуха по фронту, тем больше увеличится сопротивление радиатора, по сравнению с сопротивлением в идеальных условиях. В данном случае для оценки неравномерности поля скоростей воздуха, протекающего через радиатор, лучше всего подходит среднеквадратическое отклонение величины локальных скоростей по фронтальной поверхности радиатора  $\sigma$ , или коэффициент вариации  $v$ , обычно его называют коэффициентом неравномерности поля скоростей. Если бы аэродинамическая характеристика  $\Delta P(V)$  была линейной, тогда сопротивление такого радиатора не зависело бы от неравномерности воздушного потока.

Аэродинамическое сопротивление радиатора в реальных условиях может быть определено из выражения

$$\Delta P = \Delta P_0 \cdot k_{\Delta P},$$

где  $\Delta P_0$  - аэродинамическое сопротивление радиатора при равномерном поле скоростей потока воздуха по его фронтальной поверхности;  $k_{\Delta P}$  - коэффициент изменения аэродинамического сопротивления радиатора (для радиаторов и многих других пористых объектов  $k_{\Delta P}$  всегда больше единицы).

Получить зависимость для определения коэффициента изменения аэродинамического сопротивления радиатора можно с помощью геометрической интерпретации данной задачи (рис. 4). На рисунке изображена кривая аэродинамической характеристики радиатора  $AOB$ . Через точку  $O$  проходит прямая  $CD$ , которая является аэродинамической характеристикой радиатора, аэродинамическое сопротивление которого не зависит от неравномерности поля скоростей воздуха.

На графике аэродинамической характеристики выделен отрезок  $AB$ , ограниченный интервалом  $EF$  на оси  $V$ . Интервал  $EF$  состоит из двух равных отрезков  $\chi$ . Отрезки  $\chi$  выражают значимый диапазон разброса скорости воздуха относительно среднего значения  $V_0$ .

Коэффициент изменения аэродинамического сопротивления радиатора может быть определен с помощью выражения

$$k_{\Delta P} = \frac{S_{EABF}}{S_{ECDF}},$$

после подстановки получим



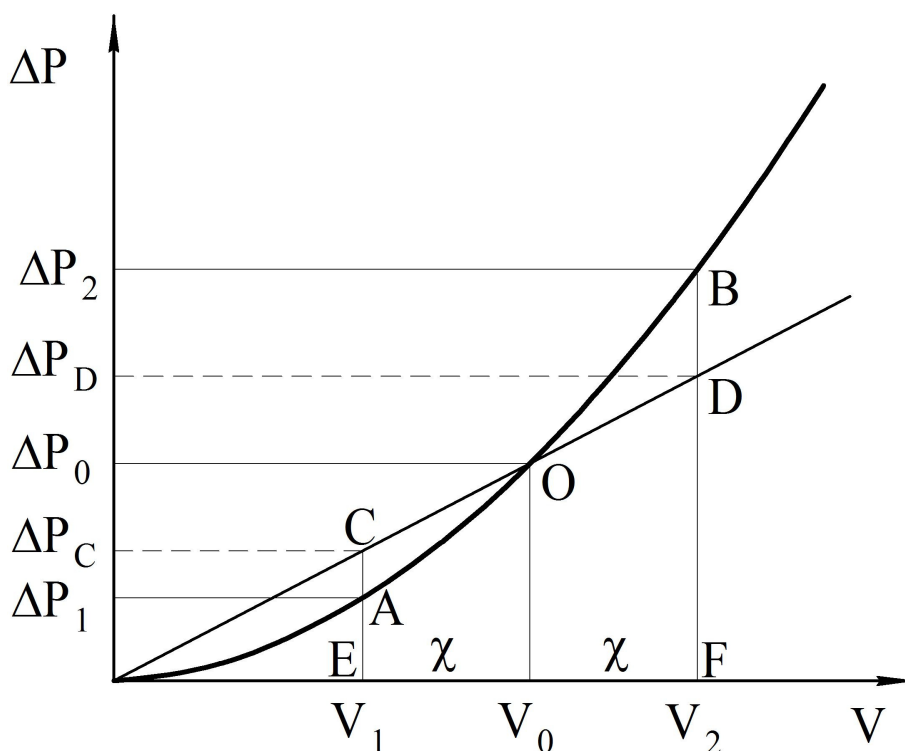


Рис. 4. Определение коэффициента изменения аэродинамического сопротивления радиатора

$$k_{\Delta P} = \frac{\int_{V_0-\chi}^{V_0+\chi} f(V) dV}{2\chi f(V_0)},$$

где  $S_{EABF}$  и  $S_{ECDF}$  - площади фигур  $EABF$  и  $ECDF$ ;  $\Delta P = f(V)$  - функция аэродинамической характеристики радиатора. Отсюда видно, что чем меньшую кривизну будет иметь линия графика аэродинамической характеристики реального радиатора проходящая, через точку  $O$ , тем меньше площадь фигуры  $EABF$  будет отличаться от площади  $ECDF$  и тем самым  $k_{\Delta P}$  будет стремиться к единице.

## **Влияние неравномерности поля скоростей воздуха на аэродинамические свойства радиатора**

Проверка данной гипотезы была произведена с помощью программного модуля Computational Fluid Dynamics (CFD), предназначенного для решения задач аэро- и гидродинамики, т.е. были выполнены численные эксперименты. Преимуществом численных экспериментов является то, что можно смоделировать не только объекты исследований с четкими заданными свойствами, но и идеальные условия выполнения эксперимента (конечно, при условии адекватного решения).

Для решения поставленных задач использовался программный модуль COSMOSFloWorks. Модуль базируется на ядре EFD.V5B при решении задач аэродинамики текучей среды используется метод конечных объемов и нестационарные уравнения Навье-Стокса. Программа автоматически анализирует геометрию внутреннего пространства камеры и формирует расчетную сетку. В процессе решения в зонах больших градиентов сетка измельчается. Для расчетов использовалась (k-ε) модель турбулентности. Пористые тела моделировались как рассредоточенные гидравлические сопротивления с изотропной проницаемостью. Поскольку внутренний канал камеры имел простую геометрическую форму, то количество ячеек сетки составляло 700-760 тысяч в зависимости от градиентов скоростей текущей среды. На входе в расчетную область задавался расход воздуха, а на выходе атмосферное давление. Граничные условия определялись геометрией аэродинамической камеры.

Для того чтобы выявить факторы, влияющие на изменение аэродинамического сопротивления радиатора под воздействием неравномерного потока воздуха, характеристики радиаторов моделировались определенным образом. Исследования проводились при двух расходах воздуха 0,1632 и 0,326 м<sup>3</sup>/с. Были взяты три базовых радиатора (рис. 5), имеющие характеристику с одинаковым коэффициентом  $a=23$  и разными показателем степени  $n=0,1$ ,  $n=0,47$  и  $n=0,7$ . Таким образом, эти характеристики охватывают достаточно большой диапазон изменения  $n$ . Эти графики  $\Delta P(V)$  имеют разную кривизну. Размеры всех исследуемых радиаторов были равны 0,34×0,48 м. Аэродинамические характеристики некоторых радиаторов в выбранном диапазоне имели гипотетические параметры.

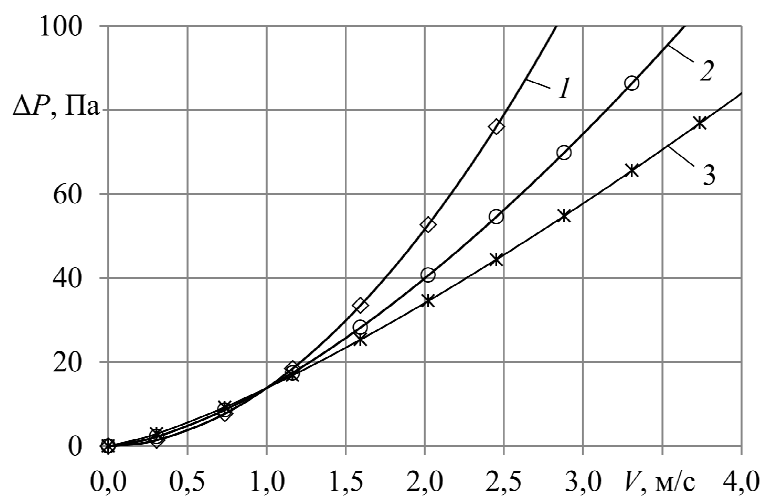


Рис. 5. Зависимость аэродинамического сопротивления радиаторов от скорости воздуха:

$$1 - \zeta = 23 \cdot V^{-0,1}; \quad 2 - \zeta = 23 \cdot V^{-0,47}; \quad 3 - \zeta = 23 \cdot V^{-0,7}$$

Кривизна линии графика функции  $\Delta P(V)$  вычисляется по формуле

$$K = \frac{|\Delta P(V)^n|}{(1 + \Delta P(V)^2)^{3/2}}$$

На рис. 6 показаны зависимости кривизны линий графиков функции  $\Delta P(V)$  от скорости воздуха, проходящего через радиаторы. Чем меньше показатель степени  $n$  и скорость воздуха, тем больше кривизна линии графика.

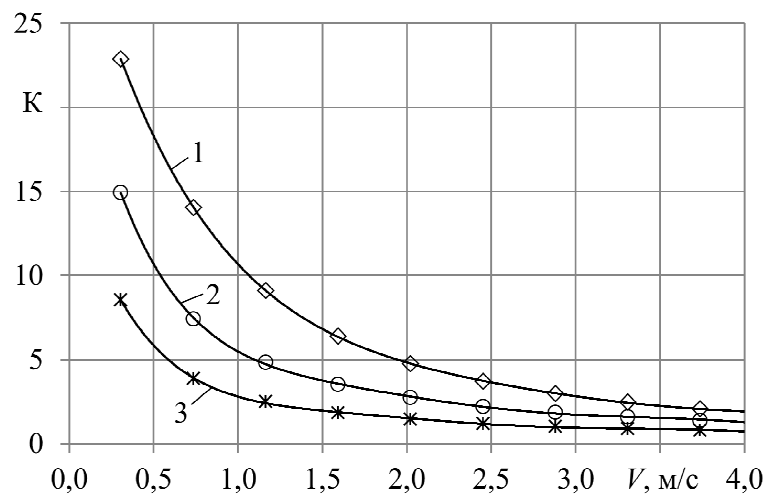


Рис. 6. Кривизна линий графиков  $\Delta P=f(V)$  в зависимости от скорости воздуха (обозначения соответствуют рис. 5)

Для проведения численного эксперимента была создана модель аэродинамической камеры, представляющая собой канал сечением  $0,41 \times 0,55$  м. Камера имела длину 2,1 м. Модели радиаторов размещались на расстоянии 0,1 м от переднего края камеры. Неравномерность воздушного потока по фронту радиатора создавалась с помощью круглого отверстия (диафрагмы) переменного сечения, выполненного на передней стенке камеры. Степень деформации потока воздуха на фронтальной поверхности радиатора зависела от размеров этого отверстия.

Смысл эксперимента заключался в том, что в комплекте с каждым базовым радиатором рассматривалось еще по три радиатора, аэродинамические характеристики которых были подобраны таким образом, что они проходили через одну точку, соответствующую заданной скорости воздуха (расхода). На рис. 7 представлен один из таких вариантов. Расход воздуха через радиаторы в данном случае задавался  $0,3264 \text{ м}^3/\text{с}$ , что соответствовало скорости воздуха через радиатор  $2 \text{ м/с}$ . Поскольку все графики проходят через одну точку, то теоретически должно быть так, что при скорости  $2 \text{ м/с}$  падение давления на всех радиаторах должно быть одинаковое. На самом деле по перечисленным причинам это не так.

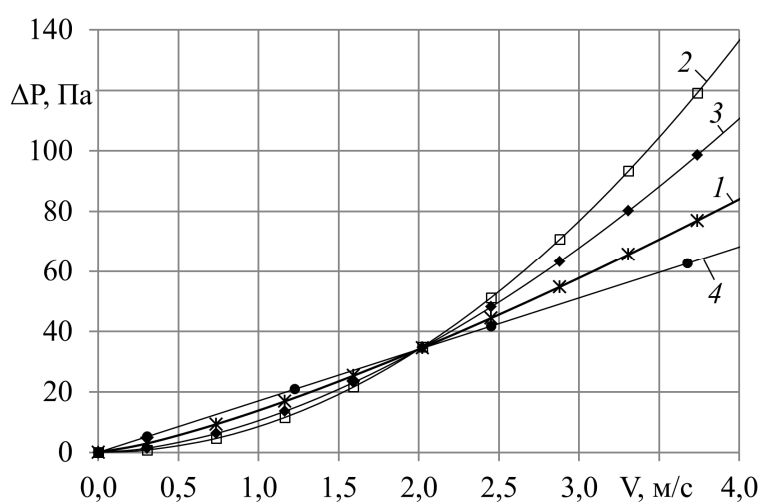


Рис. 7. Зависимость аэродинамического сопротивления радиаторов от скорости воздуха:

$$1 - \zeta = 23 \cdot V^{-0,7}; \quad 2 - \zeta = 14 \cdot V^{-0,0}; \quad 3 - \zeta = 17 \cdot V^{-0,3};$$

$$4 - \zeta = 28 \cdot V^{-1,0}$$

Задача эксперимента состояла в том, чтобы при заданном расходе воздуха через исследуемые радиаторы определить изменение падения давления на радиаторе в зависимости от неравномерности поля скоростей воздуха, которая моделировалась за счет изменения размеров диафрагмы.

За точку отсчета брался вариант, когда вместо диафрагмы входной канал был полностью открыт. В этом случае деформация воздушного потока полностью отсутствовала. Этот вариант соответствовал равномерному распределению скорости воздуха, и падение давления на радиаторе было равно  $\Delta P_0$ . Во всех остальных случаях, т.е. при других проходных сечениях диафрагмы наблюдалось, неравномерное распределение скорости воздуха (рис. 8), что приводило к увеличению падения давления  $\Delta P$ . Коэффициент изменения аэродинамического сопротивления радиатора определялся по формуле  $k_{\Delta P} = \Delta P / \Delta P_0$ .

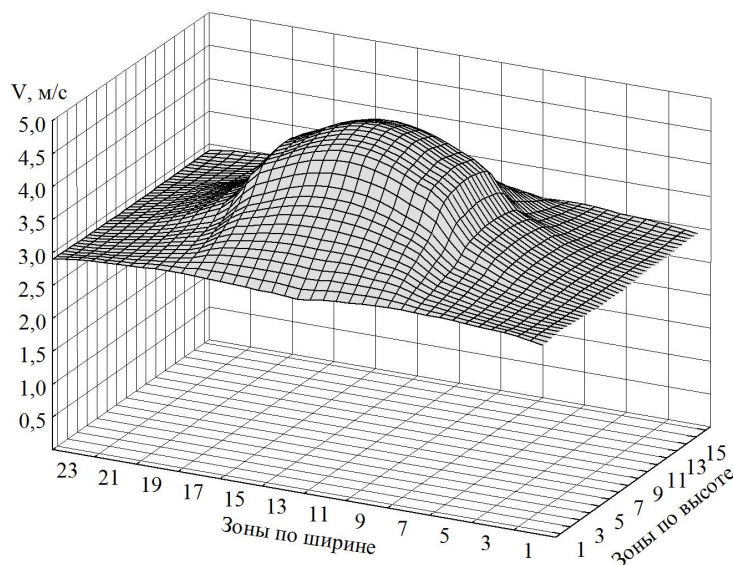


Рис. 8. Эпюра поля скоростей по фронту радиатора, при относительном сечении диафрагмы  $f=0,108$  (радиатор 2 на рис. 5,  $v=0,152$ )

Поскольку аэродинамические характеристики радиаторов разные, то и падение давления на радиаторах под воздействием неравномерного потока было разным. На рис. 9 а показаны результаты численных экспериментов. Наибольший коэффициент изменения аэродинамического сопротивления  $k_{\Delta P}$  имеет радиатор 1, потому что именно он имеет наибольшую кривизну линии  $\Delta P=f(V)$  (рис. 6). Вслед за ним идут радиаторы 2 и 3, поскольку имеют соответствующую кривизну линий графиков. Это свойство радиаторов в конечном итоге связано с показателем степени  $n$ , именно этим коэффициентом отличаются рассматриваемые радиаторы, коэффициент  $a$  у них у всех равен 23. Эта же закономерность наблюдается у радиаторов 2, 3 и 1 на рис. 9 б, хорошо видно, что именно кривизна линий графиков (рис. 10) влияет на чувствительность аэродинамического сопротивления радиаторов к неравномерности поля скоростей.

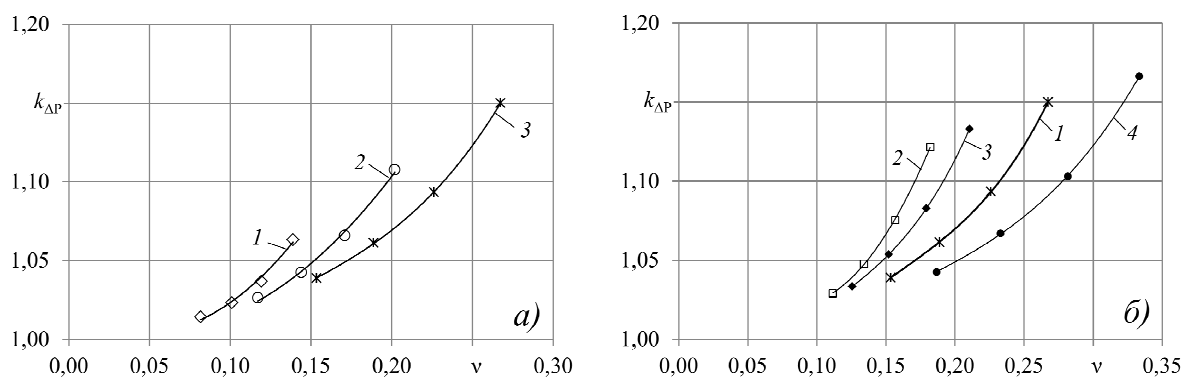


Рис. 9. Зависимость коэффициента изменения аэродинамического сопротивления радиаторов  $k_{\Delta P}$  от коэффициента неравномерности поля скоростей  $v$  (обозначения соответствуют рис. 5 и 7)

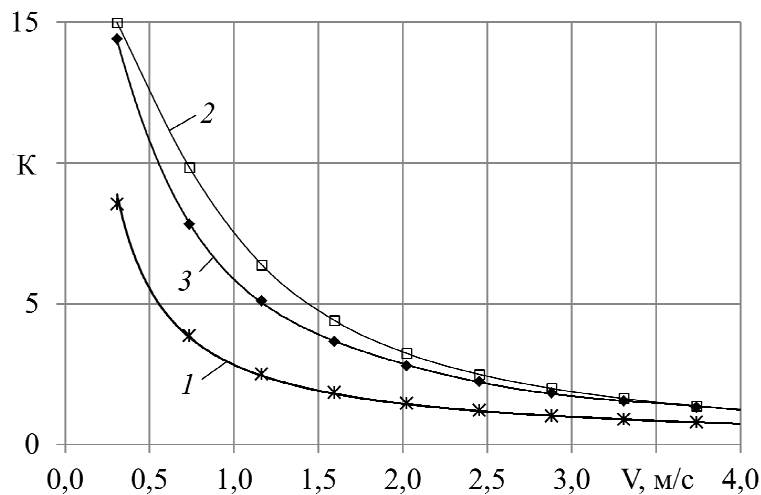


Рис. 10. Кривизна линий графиков  $\Delta P=f(V)$  в зависимости от скорости воздуха (обозначения соответствуют рис. 7)

График радиатора 4 (рис. 7) имеет линейную зависимость, и поэтому его аэродинамическое сопротивление не должно быть чувствительно к неравномерности поля скоростей воздушного потока. Но как видно по результатам численного эксперимента, это оказалось не так. Вся причина в том, что теоретические предпосылки (рис. 4), изложенные выше, предполагают, что скорость воздушного потока по фронту радиатора имеет нормальное распределение. В реальных условиях практически всегда скорости воздуха по фронту пористых объектов в значительной мере отличаются от нормального распределения. Это еще одно свойство пористых объектов, в частности радиатора. Причина такого явления также связана с нелинейной характеристикой  $\Delta P=f(V)$ . Механизм воздействия пористых объектов на неравномерный поток воздуха - это отдельная тема исследований.



Сущность данного явления показана на рис. 11. В проведенных численных экспериментах распределение скорости воздушного потока по фронту радиатора отличалось от нормального распределения и имело левую асимметрию. Вот почему у радиатора 4 (рис. 7) существенно увеличивается сопротивление под действием неравномерного потока, несмотря на то, что характеристика у него линейная. В этом случае отклонение медианы от среднего значения скорости было наибольшим и доходило до 10-15 %. При нормальном распределении наблюдается равновероятное отклонение скорости воздуха от среднего значения как в меньшую, так и в большую сторону на одинаковую величину (рис. 11 а). В случае асимметричного распределения среднее значение скорости и медиана не совпадают, поэтому интервал отклонения скорости  $-\chi$  —  $+\chi$  смещается в правую сторону (рис. 11 б). В этом случае медиана располагается на линии точки  $O$ , при этом относительно этой точки отклонение скорости влево и

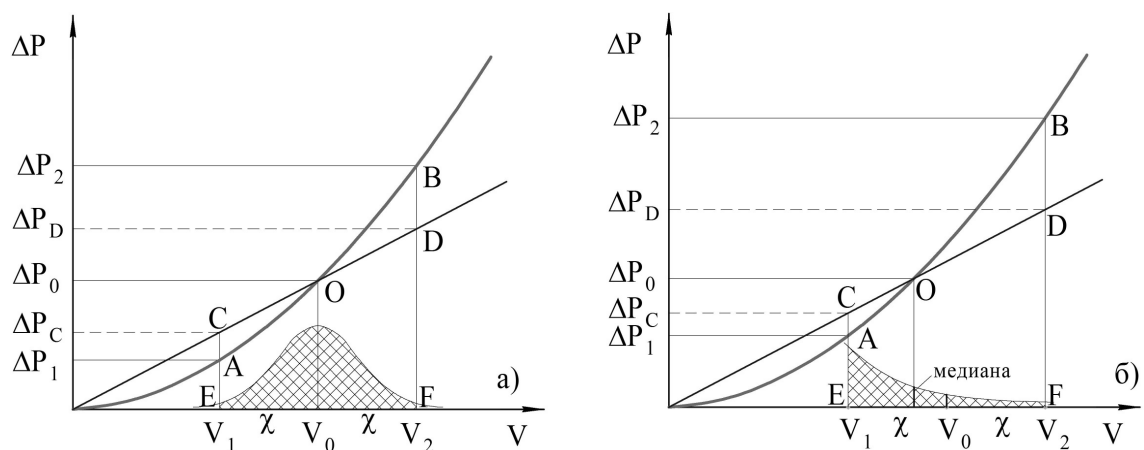


Рис. 11. Влияние распределения скорости воздуха на коэффициент изменения аэродинамического сопротивления радиатора

вправо также будет равновероятно. Вследствие сдвига трапеции  $ECDF$  вправо падение давления в точке  $V_1$  уже не будет уравновешено падением давления в точке  $V_2$ . Площадь трапеции  $ECDF$  на рис. 11 б будет больше чем рис. 11 а. В таком случае радиатор с линейной характеристикой также будет чувствителен к неравномерности поля скоростей. Причем чем выше асимметрия, тем больше увеличивается аэродинамическое сопротивление такого радиатора.

Асимметричное распределение будет влиять на  $k_{\Delta P}$  и в том случае, когда характеристика радиатора нелинейная. Это также хорошо видно на рис. 11 б. Смещение вправо фигуры  $EABF$  приводит к увеличению ее площади, а значит, к увеличению коэффициента изменения аэродинамического сопротивления радиаторов. Если асимметрия будет левая, то  $k_{\Delta P}$  будет уменьшаться.

Вторая серия численных экспериментов была выполнена при более низком расходе воздуха через радиатор -  $0,1632 \text{ м}^3/\text{с}$ , при этом средняя скорость воздуха составляла  $1,0 \text{ м/с}$ . Были взяты те же базовые радиаторы (рис. 5).

Если посмотреть на рис. 6, то можно сделать предположение, что при этой скорости рассматриваемые радиаторы должны быть значительно более чувствительны к неравномерности поля скоростей воздуха, поскольку кривизна линий графиков их характеристик в этой точке выше. Но это оказалось не так. На рис. 12 приведены результаты эксперимента на этом режиме. Величина  $k_{\Delta P}$  осталась почти такой же. Дело в том, что в данном случае влияние асимметрии

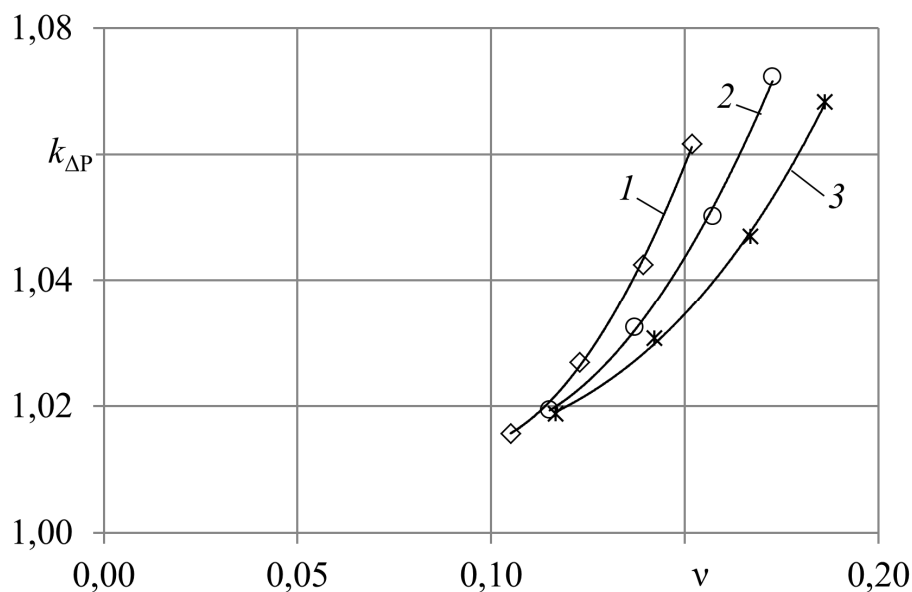


Рис. 12. Зависимость коэффициента изменения аэродинамического сопротивления радиаторов  $k_{\zeta}$  от коэффициента неравномерности поля скоростей  $v$ , при расходе воздуха  $0,1632 \text{ м}^3/\text{с}$  (обозначения соответствуют рис. 5)

распределения скоростей воздушного потока по фронту радиатора меньше, чем в первом случае. На рис. 13 показана асимметрия распределения скоростей воздуха по фронту радиатора при средней скорости 2 и 1 м/с. В данном случае асимметрия выражена отношением средней скорости воздуха к медиане  $V_{\sigma}/M_e$ . Асимметрия снижается при увеличении проходного сечения диафрагмы (коэффициент изменения проходного сечения диафрагмы выражает отношение площади диафрагмы к площади радиатора  $f=F_{\sigma}/F_p$ ). При  $f$ , равном 1, поле скоростей становится равномерным и  $V_{\sigma}/M_e=1$ .

На рис. 12 видно, что при средней скорости воздуха 2 м/с асимметрия проявляется в большей степени, чем при скорости 1 м/с. Эффект, вызванный лишь только неравномерностью без учета асимметрии, можно оценить рас-

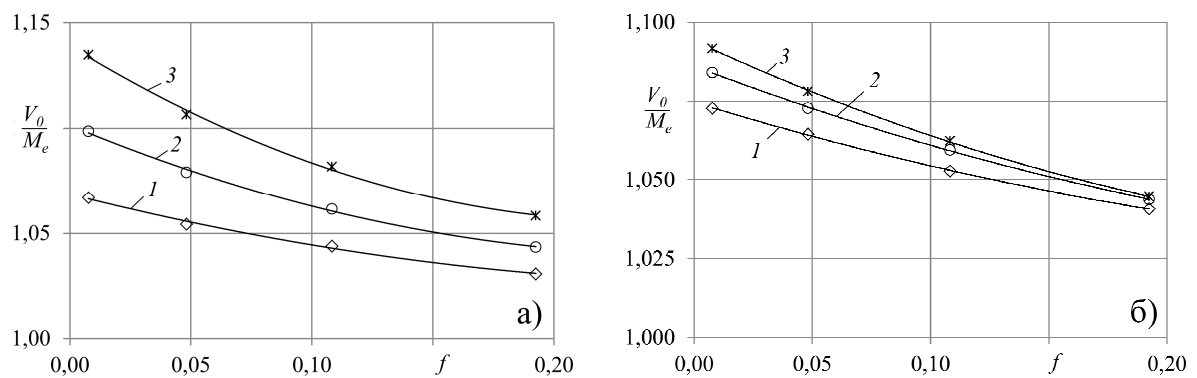


Рис. 13. Зависимость асимметрии распределения скоростей воздуха по фронту радиатора от коэффициента проходного сечения диафрагмы (обозначения соответствуют рис. 5): а) средняя скорость воздуха 2 м/с; б) средняя скорость воздуха 1 м/с

четным путем. Воспользуемся формулой  $\Delta P_i = \zeta \frac{\rho V_i^2}{2}$ , для того чтобы определить падение давления на  $i$ -тых участках радиатора, через которые проходят струйки воздуха с соответствующей скоростью  $V_i$  по полученному в эксперименте полю скоростей. Определим среднее значение падения давления по всему фронту радиатора  $\Delta P_{cp}$ . Расчетное значение коэффициента изменения аэродинамического сопротивления радиаторов определим по формуле  $k'_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{cp}}{\Delta P_0}$ , где  $\Delta P_0$  – падение давления на радиаторе при равномерном потоке воздуха. Результаты расчетов показаны на рис. 14. Видно, что при одном и том же средне-квадратическом отклонении скорости воздуха величина  $k'_{\Delta P}$  будет больше в том случае, когда средняя скорость воздуха будет меньше, что подтверждает выше сделанные выводы (в соответствии с рис. 6).

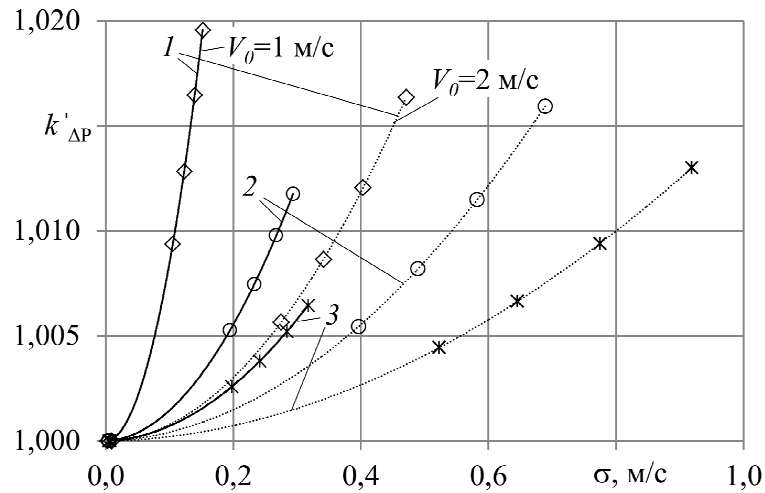


Рис. 14. Зависимость расчетного коэффициента изменения аэродинамического сопротивления радиаторов  $k'_{\Delta P}$  от среднеквадратического отклонения скорости воздуха  $\sigma$ , при средней скорости воздуха 1 и 2 м/с (обозначения соответствуют рис. 5)

#### Влияние радиатора на распределение потока воздуха по его фронту

Из вышесказанного следует, что под воздействием неравномерно распределенного потока воздуха изменяются аэродинамические свойства радиатора, т.е. увеличивается его аэродинамическое сопротивление, кроме того, мы видим, что сам радиатор влияет на поток воздуха, вынуждая его изменять свою структуру в поперечном сечении. Деформация может быть вызвана конструктивными элементами воздушного тракта, подводящего или отводящего воздух от радиатора. В результате взаимодействия с радиатором поток перераспределяется в поперечном сечении. Это свойство радиатора имеет важное значение с точки зрения его аэродинамического сопротивления и теплоотдачи.

Асимметрия распределения скорости воздуха по фронту радиатора также зависит от кривизны линии графиков функции  $\zeta = a \cdot V^{-n}$ , а значит, от показателя степени  $n$ . Чем больше  $n$ , тем больше асимметрия распределения (рис. 13). Чем меньше средняя скорость воздуха, тем больше асимметрия. При  $n=1$  асимметрия максимальна, поэтому радиатор с линейной характеристикой также зависит от коэффициента неравномерности поля скоростей.

На рис. 8 и 15 (график 2) видно, как формируется поле скоростей воздушного потока по фронту радиатора под воздействием струи, образованной за счет сужения, расположенного перед радиатором или после него. В данном случае асимметричное распределение происходит за счет центральной зоны радиатора, куда воздействует струя воздуха. В результате образуется широкий купол с высокой скоростью. Вот почему медиана смещается в сторону низких скоростей. В этих условиях большая часть потока воздуха идет через центральную зону, но, испытывая определенное сопротивление со стороны сердцевины радиатора, оставшаяся часть потока распределяется на периферийные участки. Это распределение рассматривается в сравнении с теоретическим нормальным распределением, которое имеет ту же среднюю скорость и среднеквадратическое отклонение (рис. 15).

Если перед радиатором принудительно задать поток воздуха с профилем скорости, соответствующим нормальному закону распределения (рис. 15 а,

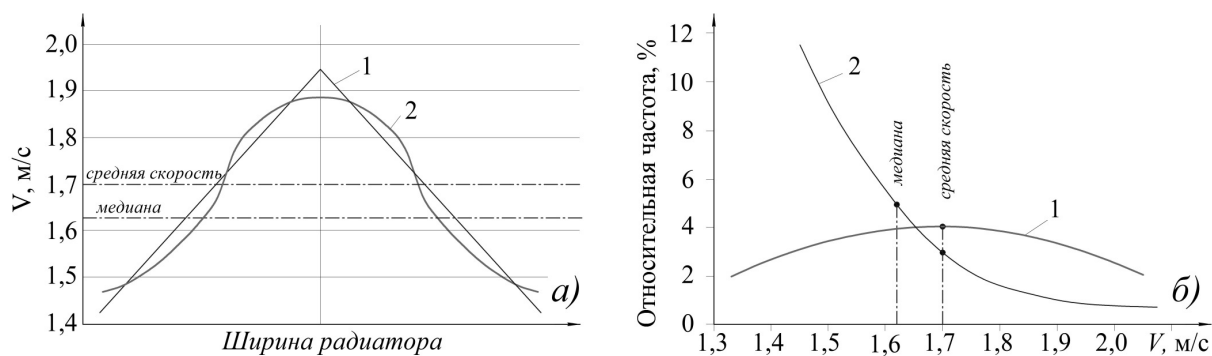


Рис. 15. Профиль скорости воздушного потока в продольной плоскости радиатора, имеющего среднюю скорость, равную 1,7 м/с, и среднеквадратическое отклонение скорости  $\sigma=0,196$  м/с - а), распределение частот скоростей потока воздуха - б): 1 – нормальный закон распределения; 2 – асимметричное распределение

график 1), то в результате взаимодействия с радиатором он все равно получит положительную асимметрию.

Вторым параметром потока воздуха, который зависит от аэродинамических свойств радиатора, является коэффициент неравномерности поля скоростей по фронту радиатора  $\nu$ . Независимо от того, есть или нет асимметрия в распределении, коэффициент неравномерности поля скоростей будет меняться в зависимости от  $\zeta(V)$ .

В данном случае неравномерность поля скоростей также зависит от кривизны линии графиков функции  $\Delta P(V)$  (рис. 16). Чем больше кривизна, тем больше радиатор выравнивает поток воздуха, поскольку кривизна линий графиков аэродинамической характеристики радиаторов зависит от средней скорости воздуха (рис. 6). Мы видим, что при средней скорости 1 м/с коэффициент неравномерности поля скоростей меньше, чем при 2 м/с (рис. 16 а и б). Как

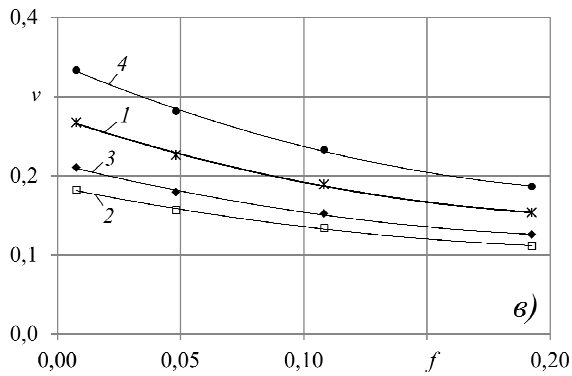
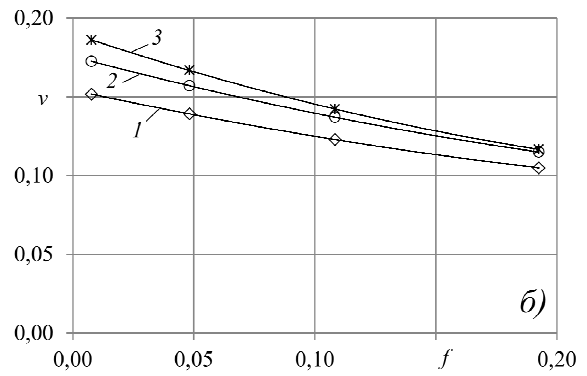
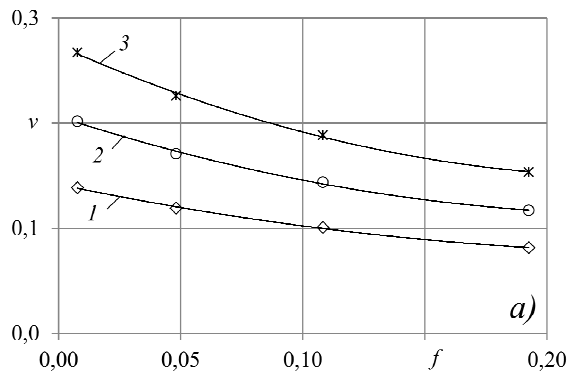


Рис. 16. Зависимость коэффициента неравномерности поля скоростей  $v$  от относительного расстояния до диафрагмы  $f$ : а) 2 м/с (обозначения в соответствии с рис. 5); б) 1 м/с (обозначения в соответствии с рис. 5); в) 2 м/с (обозначения в соответствии с рис. 7)

видно на рис. 16 в, этот эффект наблюдается для всех радиаторов. Наилучшие выравнивающие качества у радиатора 2, поскольку он имеет наибольшую кривизну (рис. 10). Хуже всего выравнивает поток воздуха радиатор 4, он имеет нулевую кривизну.

### Выводы

Проведенные исследования показали, что при прохождении потока воздуха с неравномерным распределением скорости в поперечном сечении канала через проницаемые объекты наблюдаются два взаимосвязанных процесса. С одной стороны, проницаемые объекты влияют на этот поток, с другой - нерав-



номерный поток влияет на аэродинамическую характеристику объекта. Поток воздуха, имеющий неравномерное распределение скорости в поперечном сечении канала, при прохождении через проницаемый объект частично выравнивается. Кроме того, проницаемые объекты оказывают влияние на асимметрию распределения скорости воздуха. Степень выравнивания и влияние на асимметрию распределения зависит от аэродинамической характеристики объекта. Влияние неравномерного потока воздуха на аэродинамику радиатора и влияние радиатора на воздушный поток - это взаимосвязанные процессы.

Все, что было продемонстрировано на примере радиаторов, в полной мере касается многих проницаемых объектов и не только тех, что имеют степенную зависимость аэродинамической характеристики.

#### **Библиографический список**

1. Jong Min Choi, W. Vance Payne and Piotr A. Domanski. Effects of Non-Uniform Refrigerant and Air Flow Distributions on Finned-Tube Evaporator Performance. National Institute of Standards and Technology. International Congress of Refrigeration 2003, Washington, D.C.
2. T. Bury, T. Kruczek. Application of infrared thermography for validation of numerical analyses results of a finned cross-flow heat exchanger with non uniform flow of the agents. 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. 2008, Krakow – Poland. С. 291-298.

3. T. Bury. Impact of a Medium Flow Maldistribution on a Cross-Flow Heat Exchanger Performance. Heat Exchangers – Basics Design Applications. Edited by Jovan Mitrovic. Published by InTech, 2012. Rijeka, Croatia.
4. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). – М.: Машиностроение, 1983. -351 с.
5. Исследование гидравлического сопротивления проточного тракта ВВЭР-1500 / Д. В. Зайцев, С. Г. Сергеев, Ю. А. Безруков и, Е.А. Лисенков, В.Н. Ульяновский, Л.А. Салий — Подольск: ОАО ОКБ «Гидропресс», 2009. (МНТК-2009). - URL:<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2009/disc/autorun/article45-ru.htm>.
6. Бобков А.В. Оценка влияния фронтального турбулизатора на гидравлическое сопротивление диффузора// Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3,; <http://www.science-education.ru/103-6337>.
7. Бурков В.В. Теоретическое и экспериментальное исследование обоснование путей повышения эффективности и экономичности водяных радиаторов тракторов, автомобилей и комбайнов. Докт. дис., ЛСХИ, 1968. -595 с.