

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 532.542

Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.М. Кузьма, И.В. Минеев,
М.М. Мулин, М.А. Субарев

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ФТ-18 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ В МОДЕЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье представлены разработка и обоснование экспериментального стенда, предназначенного для исследования процессов смешения потоков рабочих сред в моделях проточных частей с различной геометрией. Актуальность работы обусловлена возможностью проведения исследований гидродинамики смешивающихся потоков при режимах с большими числами Рейнольдса. Описанный в работе экспериментальный гидродинамический стенд ФТ-18 разработан на базе лабораторного комплекса НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Дано обоснование выбора циркуляционного оборудования, обеспечивающего требуемые режимные параметры – числа Рейнольдса в диапазоне $20\ 000 \div 40\ 000$. Представлено описание экспериментальной модели «Круглый канал». Выполнен расчет детурбулизирующего элемента, предназначенного для снижения паразитных пульсаций потока.

Ключевые слова: гидродинамика потоков, исследование смешения потоков, экспериментальный стенд, детурбулизирующие решетки.

В настоящее время существует ряд установок, в оборудовании которых необходимо создать такие условия, чтобы несколько потоков жидкостей или газов, отличающихся температурами, химическим составом или концентрациями переносимых примесей, имели наименьшую степень смешения на проектируемом участке. Анализ отечественной и зарубежной литературы по данной тематике показал, что исследования проводились для больших диапазонов чисел Рейнольдса $10\ 000 \div 20\ 000$ [1-4]. Другие области остаются слабоизученными, что актуализирует исследования процессов смешения потоков рабочих сред для диапазонов чисел Рейнольдса порядка $20\ 000 \div 40\ 000$.

На базе лабораторного комплекса НГТУ им. Р.Е. Алексеева был разработан экспериментальный гидродинамический стенд ФТ-18, предназначенный для моделирования и визуализации гидродинамических процессов потоков рабочих сред в моделях проточных частей с различной геометрией исследовательского участка.

На процесс смешения потоков большое влияние оказывает масштаб турбулентности на входе в измерительный канал. Она складывается из турбулентности, определяемой характером потока, и из паразитной турбулентности. Применительно к стенду ФТ-18 паразитная турбулентность обусловлена дискретностью подачи насоса, вибрацией насоса, наличием вдоль трассы циркуляции местных сопротивлений (поворотов, задвижек и конфузоров, выходов в большой объем, столкновение потока с центральной трубой), геометрией трассы. Эта составляющая турбулентности способствует интенсификация перемешивания потоков сред в общем объеме, в частности, приводит к уменьшению длины смешения. Для решения данной проблемы существуют специальные устройства (направляющие лопатки, хоннейкомб (струевыпрямитель), детурбулизирующие решетки, плавные входы в канал). Установка каждого из этих устройств сопряжена с определенными трудностями, и каждое из этих технических решений имеет различную эффективность. Из [5-12] следует, что существенное влияние с точки

зрения детурбулизации потока оказывает детурбулизирующая решетка, устанавливаемая перед входом в исследовательский канал в успокоительном баке-ресивере.

Разработка и обоснование экспериментального стенда

Экспериментальный гидродинамический стенд ФТ-18 проектировался как двухконтурная установка с принудительной циркуляцией рабочей среды по обоим контурам с возможностью циркуляции как по открытой, так и по закрытой схеме. На начальном этапе была проработана принципиальная схема (рис. 1) двухконтурной установки с принудительной циркуляцией рабочей среды по открытой схеме.

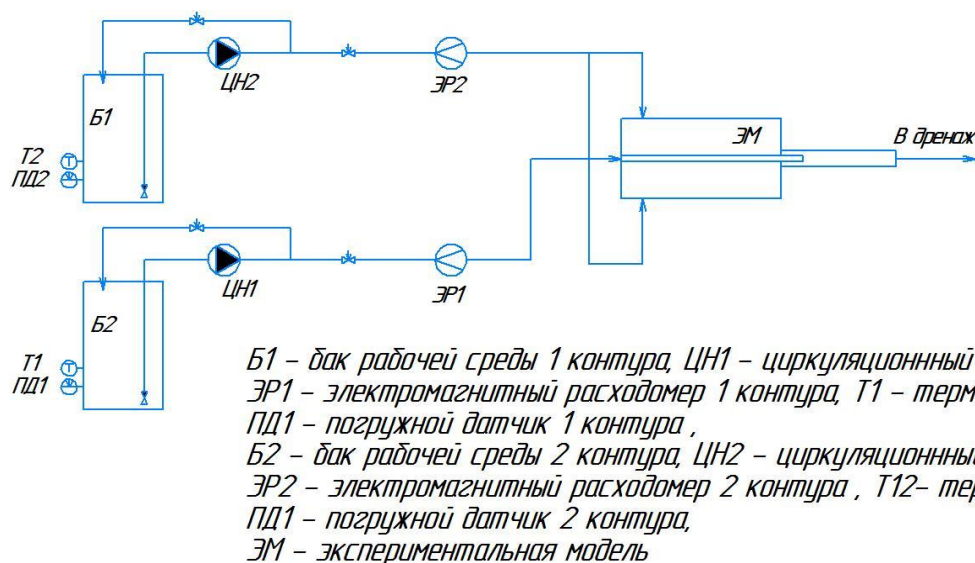


Рис. 1. Принципиальная схема стенда

В состав стенда входит следующее оборудование:

- емкости запаса воды объемом 100 л, предназначенные для запаса воды в каждом контуре и позволяющие обеспечить достаточную продолжительность эксперимента при добавлении трассера – красителя (контроль уровня жидкости в емкостях осуществляется с помощью погружных датчиков уровня; контроль температуры в емкостях осуществляется термоэлектрическими преобразователями градуировки «хромель-алюмель»);
- центробежные насосы DAB KI 30/120M – обеспечивающие циркуляцию сред по контурам;
- электромагнитные расходомеры жидкости Yokogawa ADMAG AXF – необходимые для измерения объема и расхода электропроводящей жидкости в контурах стенда;
- экспериментальные модели каналов, имитирующих проточные части элементов технических установок, в которых исследуются и визуализируются процессы гидродинамики потока движущейся среды;
- система автоматизированного управления с подключаемым к ней персональным компьютером;
- трубопроводы и арматура.

При проектировании стенда был выполнен гидравлический расчет основного контура циркуляции рабочей среды для предполагаемой трассы с целью определения потерь давления на преодоление гидравлического сопротивления трассы в зависимости от расхода рабочей среды. Гидравлический расчет проводился в соответствии с расчетной схемой (рис. 2) основного контура циркуляции.

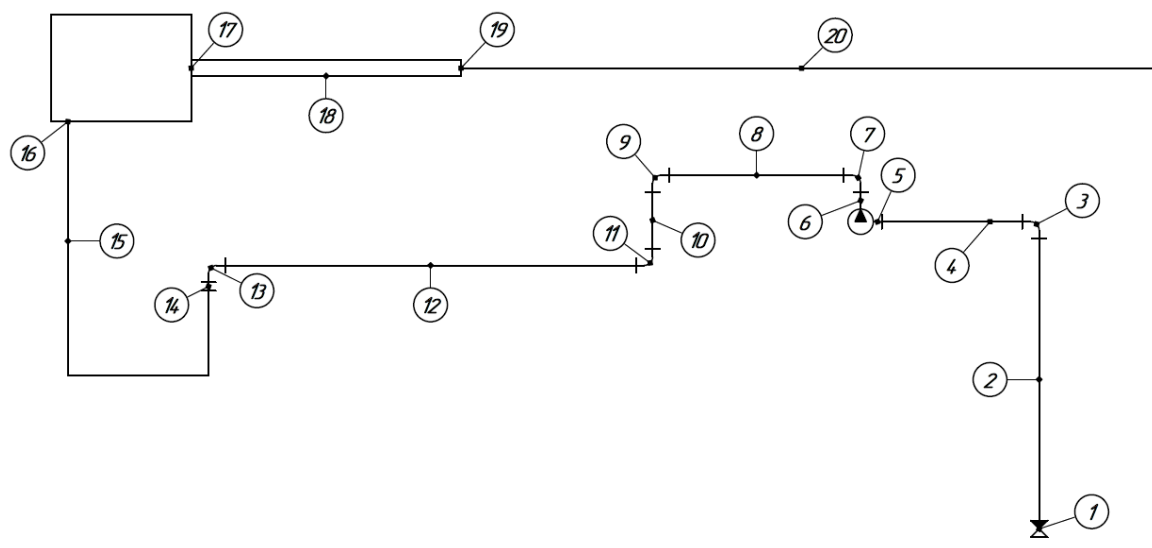


Рис. 2. Расчетная схема основного контура циркуляции

Схема разбивалась на характерные участки, для каждого из которых, в соответствии с расчетными соотношениями справочника [13], определялись следующие параметры.

1. Величины коэффициентов гидравлического сопротивления на трение (1):

$$\Delta P = \lambda(Re) \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot w_i^2}{2}, \quad (1)$$

где L_i – длина трубопровода участка сопротивления; d_i – диаметр трубопровода участка сопротивления; $w_i = \frac{4Q}{\pi \cdot d_i^2}$ – средняя скорость среды в трубопроводе; $\lambda(Re)$ – коэффициент гидравлического трения определяется по [13]; $Re_i = \frac{d_i \cdot w_i}{\nu_i}$ – критерий Рейнольдса.

2. Величины коэффициентов местных гидравлических сопротивлений (2)

$$\Delta P_i = \xi_i \frac{\rho \cdot w_i^2}{2}, \quad (2)$$

где ξ_i – коэффициент местного гидравлического сопротивления, значения которого подбирались по [13] в зависимости от конструктивной особенности местного сопротивления.

3. Общее значение перепада давления определялось как сумма перепадов по всем рассмотренным участкам (3):

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{20} \Delta P_i \quad (3)$$

Полученное расчетное значение суммарного перепада давления с учетом инженерного запаса, обусловленного погрешностями расчетных формул и упрощенной расчетной схемой, увеличивалось на 20 %. В результате гидравлического расчета была получена гидравлическая характеристика трассы экспериментального стенда $\Delta P_{\Sigma}(Q)$.

По полученной гидравлической характеристике контура по каталогам подбирался насос. Для обеспечения режимных параметров рабочей среды, в частности, высоких чисел Рейнольдса, был выбран центробежный одноступенчатый насос DAB KI 30/120M. По наложению гидравлических характеристик выбранного насоса и циркуляционного контура, была получена рабочая точка (рис. 3). Расход в рабочей точке составил $0,00215 \text{ м}^3/\text{с}$ (129 л/мин), напор 22 м (216 кПа). По полученному результату можно сказать, что насос по основному контуру циркуляции при заданной геометрии трассы сможет обеспечить необходимые режимные параметры – число $Re = 48883 > 40000$.

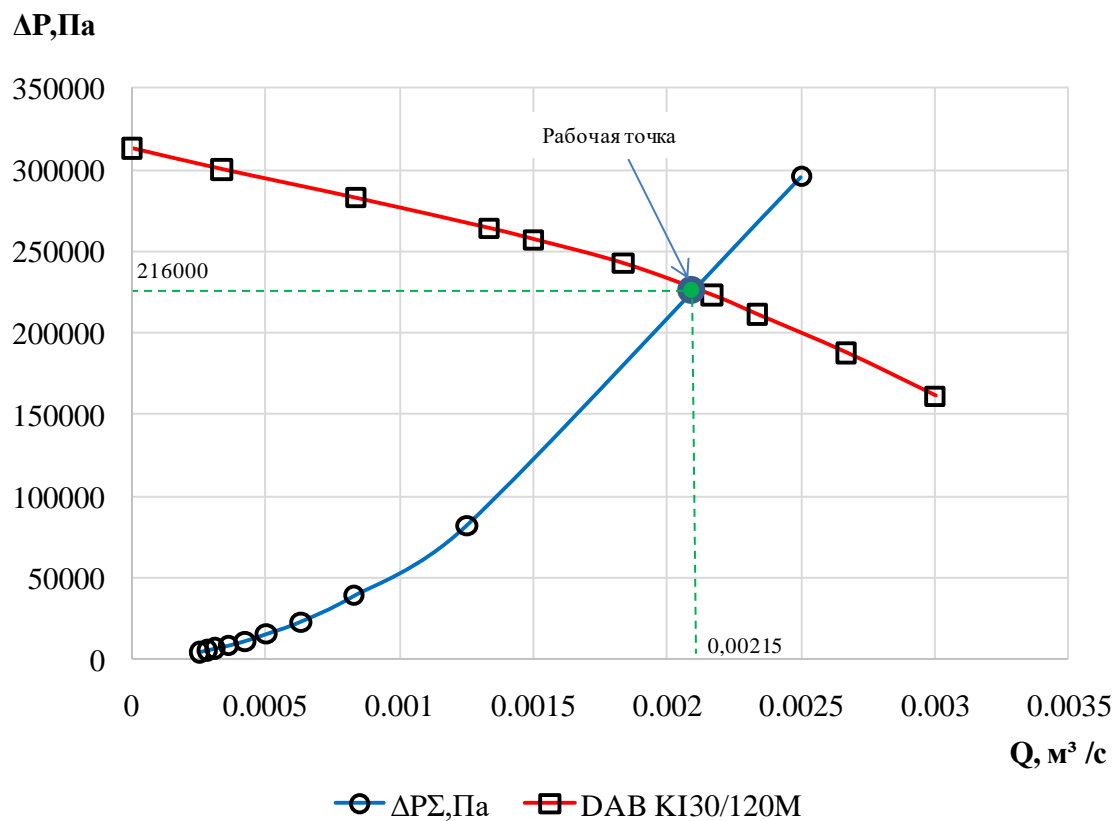


Рис. 3. Определение рабочей точки

Описание экспериментальной модели «Круглый канал»

Экспериментальная модель с каналом круглого сечения (рис. 4) предназначена для проведения пуско-наладочных работ на стенде ФТ-18 и отработки методики проведения экспериментальных исследований по исследованию процесса смешения потоков рабочих сред.

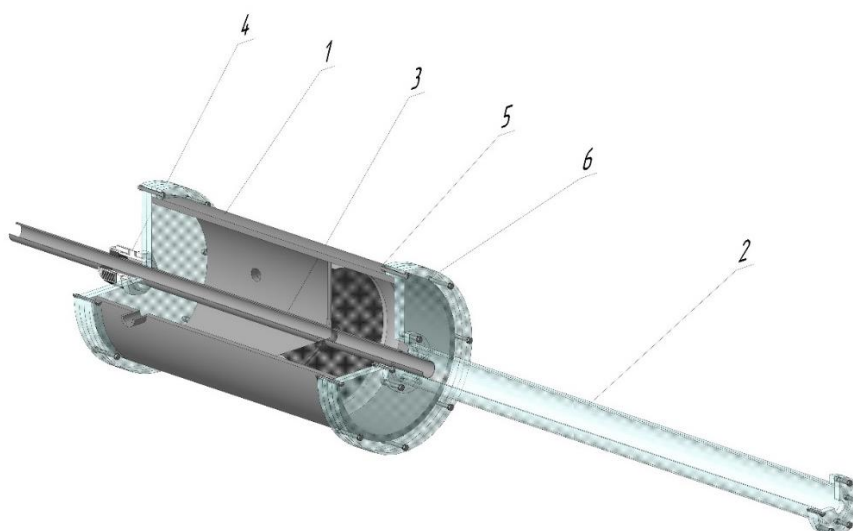


Рис. 4. Общий вид экспериментальной модели «Круглый канал»

Модель состоит из следующих основных элементов:

- успокоительный бак-ресивер (1);
- наружная прозрачная труба круглого сечения $\text{Ø}60 \times 2$ мм (2);
- внутренняя труба круглого сечения $\text{Ø}28 \times 1,5$ мм для подвода подкрашенного потока рабочей среды (3);
- детурбулизирующая решетка (6).

Бак-ресивер выполнен из полиэтиленовой трубы $\text{Ø}250 \times 10$ мм. Наружная прозрачная труба $\text{Ø}60 \times 2$ мм изготовлена из оргстекла и соединена с баком-ресивером посредством фланцевого соединения. Внутри бака-ресивера расположена внутренняя труба $\text{Ø}28 \times 1,5$, которая вводится в бак с помощью гермоввода (4). Внутри бака труба поддерживается центрирующим кольцом (5), что обеспечивает соосное расположение внутренней трубы, бака ресивера и внешнего прозрачного канала. Часть трубки $\text{Ø}28 \times 1,5$ обточена до внешнего диаметра 26 мм для уменьшения толщины стенки и снижения ее влияния на процесс смешивания потоков рабочих сред. Эта часть выходит из бака-ресивера и входит внутрь прозрачной внешней трубы, образуя тем самым с ней кольцевой канал. Длину части трубы в кольцевом канале можно менять путем ослабления обжатия гермоввода и перемещения на требуемое расстояние.

Расчет детурбулизирующей решетки для установки на вход рабочего участка измерительного канала стенда ФТ-18

Степень турбулентности потока в измерительном канале можно регулировать с помощью проволочных сеток, установленных в успокоительном баке-ресивере перед каналом (рис. 4). В экспериментальном стенде ФТ-18 сетки планируется использовать для гашения имеющейся в потоке турбулентности. В связи с этим возникает проблема выбора оптимальной геометрии сетки, способной наиболее эффективно гасить турбулентные пульсации при минимальном сопротивлении. В существующих теоретических и экспериментальных отечественных и зарубежных исследованиях нет единой точки зрения по этому вопросу [5-12]. Рассматривалось 16 двухплоскостных и 18 плетеных сеток [5] (рис. 5).

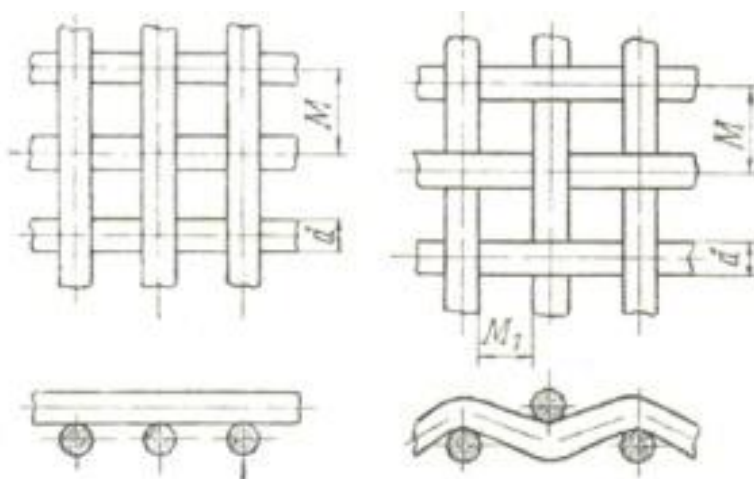


Рис. 5. Двухплоскостная и плетеная сетки

Характерное число Рейнольдса для каждой сетки зависит как от скорости набегающего потока, так и от номера сетки (4) [5, с.15]:

$$Re_{dm} = \omega d / (1 - S) v \quad (4)$$

где ω , м/с – скорость набегающего потока; d , мм – диаметр прутка; S – коэффициент заполнения сетки; ν , м²/с – кинематическая вязкость среды.

При использовании проволочной сетки для снижения турбулентности набегающего потока степень турбулентности ε_1 за сеткой зависит, как от уровня турбулентности ε_0 (относительная интенсивность поперечной составляющей пульсаций скорости [15, с. 87]) в набегающем потоке, так и от уровня собственной турбулентности ε_c , порождаемой сеткой (образованием вихрей при прохождении потока через сетку). При этом качество сетки характеризуется величиной коэффициента уменьшения турбулентности $F = \varepsilon_1/\varepsilon_0$, который определяется как отношение степени турбулентности $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(x)$ за сеткой на расстоянии x от сетки к величине $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(x)$, измеренной в той же точке при отсутствии сетки [5, с. 17].

Анализ опытных данных показывает, что результаты измерений удобно представлять в виде отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_0$ в функции от $\varepsilon_c/\varepsilon_0$. Один из важных выводов, следующих из проведенных расчетов, состоит в том, что существует некоторое оптимальное значение $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$, при котором наблюдается минимум $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$, т.е. сетка наиболее эффективно подавляет турбулентность набегающего потока.

Отношение $\varepsilon_1/\varepsilon_0$ выражается эмпирической зависимостью (5) [5, с. 18]:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = \sqrt{\frac{1+3\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2}{2(1+K)}} \quad \text{при} \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} > \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)_{opt}. \quad (5)$$

Для разных гасящих сеток величина $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$ принимает различные значения, зависящие как от K , так и от числа Re_{dm} , и может быть определена из следующего эмпирического соотношения (6) [5, с. 18]:

$$\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)_{opt} = 1 - 0.7 \cdot \left(\frac{Re_{dm}}{100\sqrt{1+K}}\right)^{-0.6} \quad \text{при} \quad \frac{Re_{dm}}{\sqrt{1+K}} \geq 75. \quad (6)$$

В случае $\varepsilon_c/\varepsilon_0 < (\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$ зависимость $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$ может быть определена по формуле (7) [5, с. 19]:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{1 - (\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}}{(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}} \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \quad \text{при} \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} < \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)_{opt}, \quad (7)$$

где значение $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$ определяется из соотношения (5) при $\varepsilon_c/\varepsilon_0 = (\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$, рассчитанном по формуле (6).

Совместное решение (5) и (7) с учетом (6) представлялось в виде зависимости $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$ для каждого значения расхода и каждого типа сеток, которые входил в функцию $f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$ как параметры: $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\text{тип сетки, расход, } \varepsilon_c/\varepsilon_0)$. Расчет выполнен для двухплоскостных сеток С1-С16 (рис. 6) и для плетеных сеток С17-С34 (рис. 7).

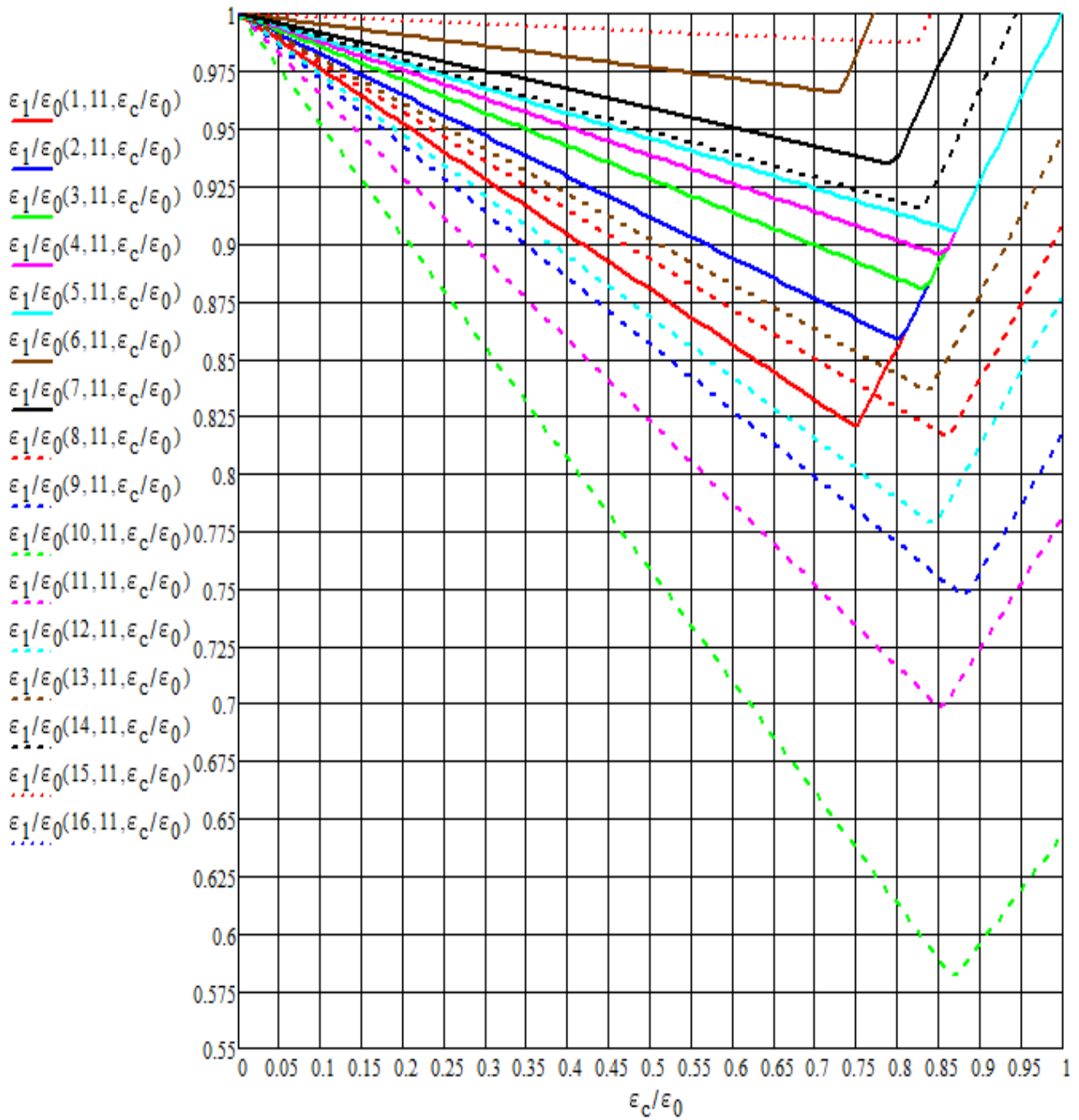


Рис. 6. Зависимость $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$ для двухплоскостных сеток C1 – C16 при номинальном расходе 50 л/мин

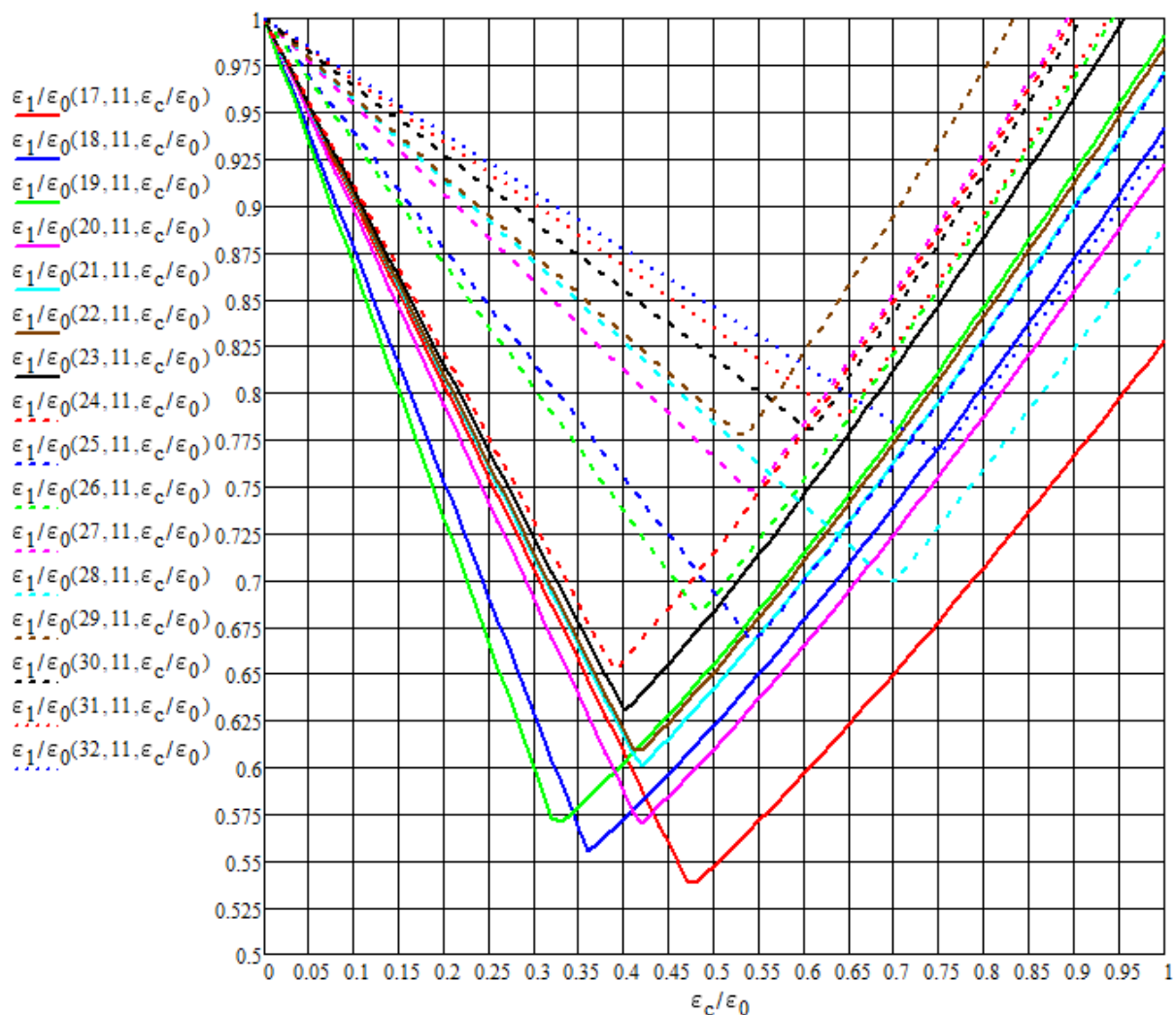


Рис. 7. Зависимость $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$ для плетеных сеток C17 – C34 при номинальном расходе 50 л/мин

Из приведенных графиков видно, что наиболее оптимальное значение коэффициента уменьшения турбулентности $\varepsilon_1/\varepsilon_0$ набегающего потока имеет двухплоскостная сетка с порядковым номером C10 ($M = 4$ мм, $d = 2$ мм) и плетеная сетка с номером C17 ($M = 0,68$ мм, $d = 0,25$ мм).

Полученные графики подтверждают вывод теоретических выкладок о наличии некоторого оптимального отношения $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$, при котором наблюдается минимум $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$, т.е. сетка наиболее эффективно подавляет турбулентность набегающего потока в измерительный канал.

Приведем графические зависимости коэффициента уменьшения турбулентности $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$ при $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$ как функция расхода (рис. 8).

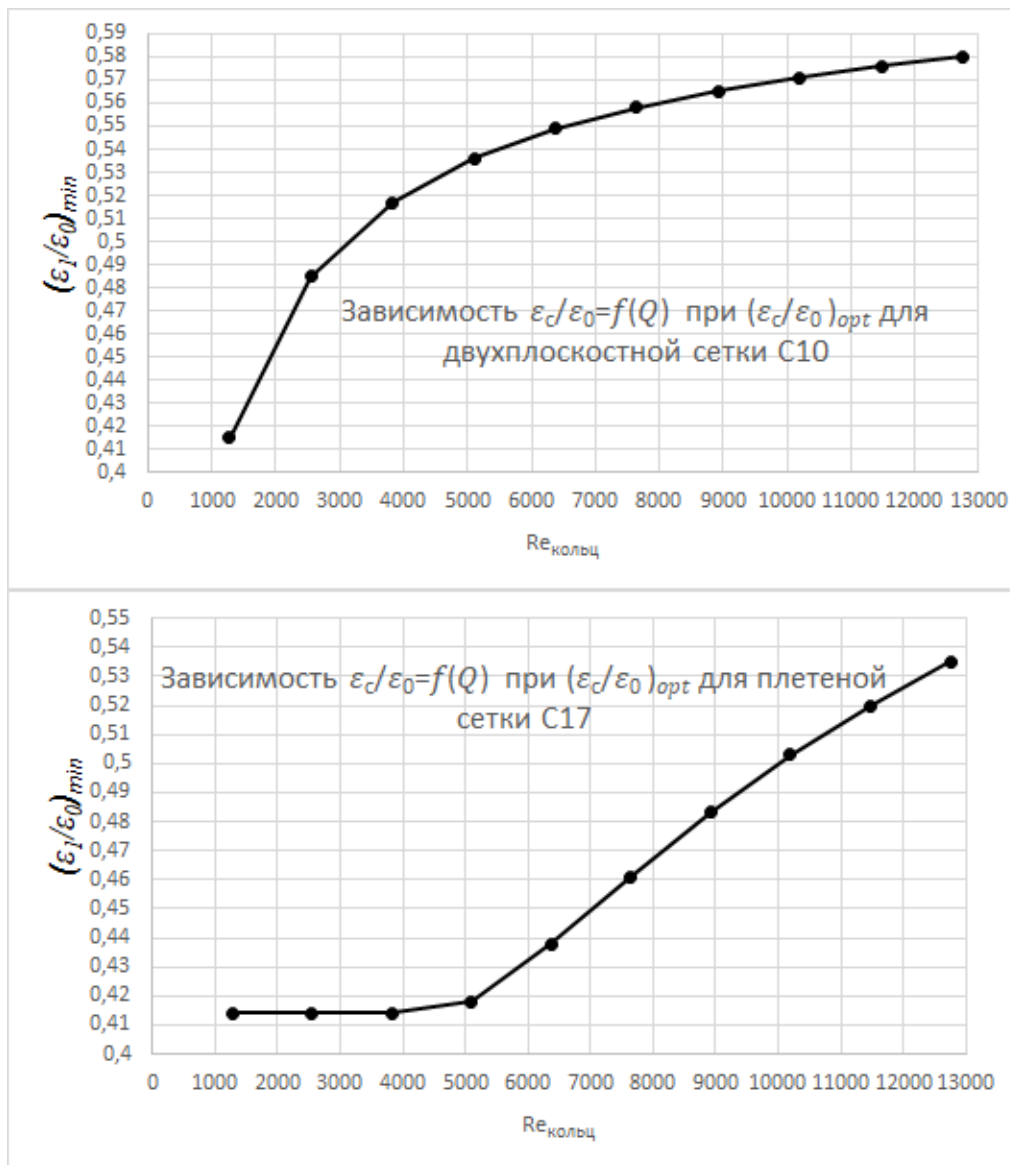


Рис. 8. Зависимость $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$ при $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$ от расхода

Заключение

В статье отражены основные этапы разработки экспериментального стенда ФТ-18. Представлено обоснование выбора циркуляционного оборудования, обеспечивающего требуемые режимные параметры – числа Рейнольдса в диапазоне $20000 \div 40000$. Приведено конструктивное исполнение экспериментальной модели «Круглый канал». Выполнен комплексный анализ детурбулизирующих решеток, на основе которого получены размеры детурбулизирующей сетки, предназначенной для установки в успокоительном баке-ресивере. Наилучшим из рассмотренных вариантов является плетенная сетка С17 (размер ячейки $M = 0,68$ мм, диаметр прутка $d = 0,25$ мм), имеющая оптимальное значение коэффициента уменьшения турбулентности $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = 0,58$ набегающего потока.

Библиографический список

1. **Фрост, У.** Турбулентность. Принципы и применения / У. Фрост, Т. Моулден. – М.: Мир, 1980. – 535 с.
2. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг., М.: Наука, 1974. – 712 с.
3. **Хинце, И.О.** Турбулентность. Ее механизм и теория. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 680 с.
4. Методы расчета турбулентных течений / под. ред. В. Кольмана. – М.: Мир. 1984. – 464с.
5. **Дербунович, Г.И.** Использование сеток для управления структурой турбулентного потока в аэродинамических трубах / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1982. – Т. 8, – №1. – С.17.
6. **Дербунович, Г.И.** К вопросу о гидравлическом сопротивлении сеток / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1980. – Т. 11. – №2. – С.135.
7. **Михайлов, Н.П.** Сочетание хонейкомба с сеткой для подавления турбулентности потока / Н.П. Михайлов, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1998. – Т. 19. – №1-2. – С. 86.
8. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных сечений на сетках гибридной структуры с использованием схем высокого порядка точности / А.С. Козелков, Р.Н. Жучков, А.А. Уткина, К.Б. Володченко // ВАНТ. Серия Математическое моделирование физических процессов. 2014. – С.18.
9. **Дербунович, Г.И.** Оптимальные условия гашения турбулентности потока в рабочей части аэродинамической трубы с помощью сеток, установленных в форкамере / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1989. – Т. 20, – №3. – 1989. – С. 37.
10. **Дербунович, Г.И.** Оптимальные условия детурбулизации потока с помощью набора сеток / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Известия АН СССР, МЖГ. – 1993. №1. – С. 15-20.
11. **Dryden, H.L.** The use of damping screens for the reduction of wind-tunnel turbulence / H.L. Dryden, G.V. Schubauer // J. Aeron. Sci. – 1947. – Vol. 14. – № 4.
12. **Groth, J.** Turbulence reduction by screens / J. Groth, A.V. Johansson //J. Fluid Mech. – 1988. – V. 197.
13. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение. – 1975. – 672 с.
14. **Михайлова, Н.П.** Сочетание хонейкомба с сеткой для подавления турбулентности потока / Н.П. Михайлова, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1998. – Т. 29. – № 1-2. – С. 86-94.

*Дата поступления
в редакцию: 01.04.2019*

Y.I. Anoshkin, A.A. Dobrov, M.M. Kuzma, I.V. Mineev, M.M. Mulin, M.A. Subarev

**DEVELOPMENT AND VALIDATION OF EXPERIMENTAL STAND FT-18
TO STUDY PROCESSES OF MIXING IN MODELS OF DIFFERENT GEOMETRY**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The article is devoted to the development and validation of an experimental stand designed to study the processes of mixing in models of different geometry. The relevance of the work is due to the possibility to study the hydrodynamics of mixing flows under conditions with large Reynolds numbers.

Approach: Development of the concept of the stand. Hydraulic validation of the main circulation loop in order to obtain a working point to justify the selection of circulation equipment that provides operating parameters of the flow. The design of the experimental model of the «Round channel». Calculation of deturbulating elements to reduce parasitic turbulence in the mixing zone.

Results: An experimental test bench has been developed and substantiated for the study of the hydrodynamic processes of working medium flows in models of flow parts of technical installation elements, in particular, for studying the processes of mixing working medium flows. An experimental model «Round channel» has been developed. The calculation of the deturbulating element designed to reduce parasitic pulsations of the flow has been performed.

Key words: hydrodynamics flows, the study of mixing flows, experimental stand, deturbulating grid.