

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г.ШУХОВА»  
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

УТВЕРЖДАЮ  
Директор института  
  
« 16 » 06 2016 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**дисциплины**

**Математическое моделирование наружных инженерных сетей**  
(наименование дисциплины, модуля)

направление подготовки (специальность):

08.03.01 «Строительство»

(шифр и наименование направления бакалавриата, магистратуры, специальности)

Направленность программы (профиль, специализация):

«Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий,  
сооружений, населенных пунктов»

Квалификация

бакалавр

(бакалавр, магистр, специалист)

Форма обучения

очная

(очная, заочная и др.)

Вид деятельности: изыскательская и проектно-конструкторская



Институт: архитектурно-строительный

Кафедра: теплогазоснабжения и вентиляции

Белгород – 2016

Рабочая программа составлена на основании требований:

- Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» (уровень бакалавриата), утвержденного приказом № 201 от 12.03.2015 г.
- плана учебного процесса БГТУ им. В.Г. Шухова, введенного в действие в 2016 году.

Составитель: д-р техн. наук, профессор  (К.И. Логачев)  
д-р техн. наук, профессор  (О.А. Аверкова)  
(ученая степень и звание, подпись) (инициалы, фамилия)

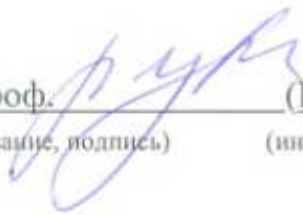
Рабочая программа согласована с выпускающей кафедрой  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»

Заведующий кафедрой: д-р техн. наук, проф.  (В.А. Уваров)  
(ученая степень и звание, подпись) (инициалы, фамилия)

« 08 » 06 2016 г.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры  
«Теплогазоснабжения и вентиляции»

«08» 06 2016 г., протокол № 15

Заведующий кафедрой: д-р техн. наук, проф.  (В.А. Уваров)  
(ученая степень и звание, подпись) (инициалы, фамилия)

Рабочая программа одобрена методической комиссией института  
«Архитектурно-строительного»

«16» 06 2016 г., протокол № 11

Председатель канд. техн. наук, доцент  (А.Ю. Феоктистов)  
(ученая степень и звание, подпись) (инициалы, фамилия)

## 1. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Формируемые компетенции			Требования к результатам обучения
№	Код компетенции	Компетенция	
1	(ОПК-1)	Способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и математического (компьютерного) моделирования, теоретического и экспериментального исследования	<p>В результате освоения дисциплины обучающийся должен</p> <p><b>Знать:</b> простейшие математические модели процессов ТГВ;</p> <p><b>Уметь:</b> решать практические задачи с использованием методов компьютерного моделирования;</p> <p><b>Владеть:</b> аппаратом численного решения задач</p>
<b>Профессиональные</b>			
2	(ПК-2)	владением методами проведения инженерных изысканий, технологией проектирования деталей и конструкций в соответствии с техническим заданием с использованием универсальных и специализированных программно-вычислительных комплексов и систем автоматизированных проектирования	<p>В результате освоения дисциплины обучающийся должен</p> <p><b>Знать:</b> компьютерные методы моделирования технологических процессов</p> <p><b>Уметь:</b> использовать компьютерные методы для совершенствования технологических процессов</p> <p><b>Владеть:</b> навыками использования информационных технологий для совершенствования технологических процессов</p>

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Содержание дисциплины основывается и является логическим продолжением следующих дисциплин:

№	Наименование дисциплины (модуля)
1	Математика
2	Физика

Содержание дисциплины служит основой для изучения следующих дисциплин:

№	Наименование дисциплины (модуля)
1	Выполнение ВКР

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зач. единиц, 72 часов.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестр № 6
Общая трудоемкость дисциплины, час	72	72
<b>Контактная работа (аудиторные занятия), в т.ч.:</b>	34	34
лекции	17	17
лабораторные	17	17
практические	-	-
<b>Самостоятельная работа студентов, в том числе:</b>	38	38
Курсовой проект	-	-
Курсовая работа	-	-
Расчетно-графическое задания	-	-
Индивидуальное домашнее задание	9	9
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>	29	29
Форма промежуточная аттестация (зачет, экзамен)	Зачет	Зачет

**4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**4.1 Наименование тем, их содержание и объем**  
**Курс 3 Семестр 6**

№ п/п	Наименование раздела (краткое содержание)	Объем на тематический раздел по видам учебной нагрузки, час			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
1. Метод сеток, разностные схемы					
	Основные понятия и определения. Краевая задача для уравнения Пуассона. Графическое представление решения.	4		2	4
2. Основные разностные схемы для решения нестационарного уравнения теплопроводности.					
	Явная схема. Неявная схема. Решение уравнения теплопроводности с использованием явной схемы. Решение уравнения теплопроводности с использованием неявной схемы.	4		4	6
3. Численное моделирование вихревых течений в закрытых вытяжных устройствах.					
	Вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в аспирационном укрытии. Комбинация методов граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей. Расчет течений в многосвязных пульсирующих газодинамических областях	2		4	5
4. Численное моделирование вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.					
	Вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в многосвязных областях с разрезами. Условие Томпсона. Расчет течения на входе в щелевидные каналы с экранами. Расчет течения в многосвязных областях с разрезами.	2		3	5
5. Численный метод дискретных вихревых многоугольников					
	Поле скоростей от вихревого отрезка. Вихревые многоугольники. Расчет вихревых течений газа на входе в квадратные и многоугольные всасывающие каналы. Расчет экранированных вытяжных устройств. Оптимизация вытяжных устройств по критерию дальности.	2		4	5
6. Метод дискретных стационарных вихрей					
	Вычислительный алгоритм расчета на входе в щелевидный и круглый всасывающие каналы при задании величины постоянной циркуляции на	3			2

8	Численное моделирование вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.	Расчет течения в многосвязных областях с разрезами.	2	2
9	Численный метод дискретных вихревых многоугольников	Расчет вихревых течений на входе в квадратный всасывающий канал.	1	1
10	Численный метод дискретных вихревых многоугольников	Расчет вихревых течений на входе в круглый всасывающий канал.	1	1
11	Численный метод дискретных вихревых многоугольников	Расчет вихревых течений на входе в экранированный всасывающий канал.	2	2
ВСЕГО:			17	17

**5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**4.1 Наименование тем, их содержание и объем**  
**Курс 4 Семестр 7**

№ п/п	Наименование раздела (краткое содержание)	Объем на тематический раздел по видам учебной нагрузки, час			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
7. Метод сеток, разностные схемы					
	Основные понятия и определения. Краевая задача для уравнения Пуассона. Графическое представление решения.	4		2	4
8. Основные разностные схемы для решения нестационарного уравнения теплопроводности.					
	Явная схема. Неявная схема. Решение уравнения теплопроводности с использованием явной схемы. Решение уравнения теплопроводности с использованием неявной схемы.	4		4	6
9. Численное моделирование вихревых течений в закрытых вытяжных устройствах.					
	Вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в аспирационном укрытии. Комбинация методов граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей. Расчет течений в многосвязных пульсирующих газодинамических областях	2		4	5
10. Численное моделирование вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.					
	Вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в многосвязных областях с разрезами. Условие Томпсона. Расчет течения на входе в щелевидные каналы с экранами. Расчет течения в многосвязных областях с разрезами.	2		3	5
11. Численный метод дискретных вихревых многоугольников					
	Поле скоростей от вихревого отрезка. Вихревые многоугольники. Расчет вихревых течений газа на входе в квадратные и многоугольные всасывающие каналы. Расчет экранированных вытяжных устройств. Оптимизация вытяжных устройств по критерию дальности.	2		4	5
12. Метод дискретных стационарных вихрей					
	Вычислительный алгоритм расчета на входе в щелевидный и круглый всасывающие каналы при задании величины постоянной циркуляции на	3			2

	свободной поверхности тока. Вычислительный алгоритм расчета на входе в щелевидный и круглый всасывающие каналы при средней скорости всасывания. Расчет изменения к.м.с. входа в неплотности щелевидной и круглой формы при их механическом экранировании. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы в неограниченном пространстве. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы над непроницаемой плоскостью. Расчет течений на входе в круглый всасывающий патрубок при наличии набегающего потока. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы при наличии набегающего потока				
	<b>ВСЕГО</b>	17		17	27

#### 4.2. Содержание практических (семинарских) занятий

Не предусмотрены

#### 4.3. Содержание лабораторных занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Тема лабораторного занятия	К-во часов	К-во часов СРС
<b>семестр № 1</b>				
1	Метод сеток, разностные схемы	Краевая задача для уравнения Пуассона.	2	2
2	Основные разностные схемы для решения нестационарного уравнения теплопроводности.	Решение уравнения теплопроводности с использованием явной схемы.	2	2
3	Основные разностные схемы для решения нестационарного уравнения теплопроводности.	Решение уравнения теплопроводности с использованием неявной схемы.	2	2
4	Численное моделирование вихревых течений в закрытых вытяжных устройствах.	Расчет вихревых течений в замкнутых областях.	2	2
5	Численное моделирование вихревых течений в закрытых вытяжных устройствах.	Расчет пылегазовых потоков в пульсирующих газодинамических полях	2	2
6	Численное моделирование вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.	Расчет течения на входе в щелевидные каналы с механическими экранами	1	1



8	Численное моделирование вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.	Расчет течения в многосвязных областях с разрезами.	2	2
9	Численный метод дискретных вихревых многоугольников	Расчет вихревых течений на входе в квадратный всасывающий канал.	1	1
10	Численный метод дискретных вихревых многоугольников	Расчет вихревых течений на входе в круглый всасывающий канал.	1	1
11	Численный метод дискретных вихревых многоугольников	Расчет вихревых течений на входе в экранированный всасывающий канал.	2	2
ВСЕГО:			17	17

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Перечень контрольных вопросов (типовых заданий)

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание вопросов (типовых заданий)
1	Метод сеток, разностные схемы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Основные понятия и определения.</li> <li>2. Краевая задача для уравнения Пуассона.</li> <li>3. Графическое представление решения.</li> </ol>
2	Основные разностные схемы для решения нестационарного уравнения теплопроводности.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Явная схема.</li> <li>2. Неявная схема.</li> <li>3. Решение уравнения теплопроводности с использованием явной схемы.</li> <li>4. Решение уравнения теплопроводности с использованием неявной схемы.</li> </ol>
3	Численное моделирование вихревых течений в закрытых вытяжных устройствах.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в аспирационном укрытии.</li> <li>2. Комбинация методов граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей.</li> <li>3. Расчет течений в многосвязных областях в пульсирующих газодинамических полях.</li> </ol>
4	Численное моделирование вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.</li> <li>2. Условие Томпсона неизменности циркуляции.</li> <li>3. Расчет течения на входе в щелевидные неплотности аспирационных укрытий.</li> <li>4. Расчет течения в областях с тонкими экранами.</li> </ol>
5	Численный метод дискретных вихревых многоугольников	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Поле скоростей от вихревого отрезка.</li> <li>2. Вихревые многоугольники.</li> <li>3. Расчет вихревых течений на входе в квадратные и многоугольные всасывающие каналы.</li> <li>4. Расчет экранированных вытяжных устройств.</li> <li>5. Оптимизация вытяжных устройств по критерию дальности.</li> </ol>
6.	Метод дискретных стационарных вихрей	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вычислительный алгоритм расчета на входе в щелевидный и круглый всасывающие каналы при задании величины постоянной циркуляции на свободной поверхности тока.</li> <li>2. Вычислительный алгоритм расчета на входе в щелевидный и круглый всасывающие каналы при средней скорости всасывания.</li> <li>3. Расчет изменения к.м.с. входа в неплотности щелевидной и круглой формы при их механическом экранировании.</li> <li>4. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы в неограниченном пространстве.</li> <li>5. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы над непроницаемой плоскостью.</li> <li>6. Расчет течений на входе в круглый всасывающий патрубок при наличии набегающего потока.</li> <li>7. Расчет течений на входе в отсосы-раструбы при наличии набегающего потока.</li> </ol>

## 5.2. Перечень тем курсовых проектов, курсовых работ, их краткое содержание и объем.

Не предусмотрены

## 5.3. Перечень индивидуальных домашних заданий, расчетно-графических заданий.

1. Исследование осевой скорости вблизи всасывающих отверстий.

Выполнение ИДЗ предусматривает выполнение расчета по определению осевой скорости вблизи всасывающих отверстий различной формы и определение наиболее дальнобойного отверстия, а также сравнение расчетных значений осевой скорости, найденных в рамках различных математических моделей.

**Цель задания:** приобретение практических навыков по применению метода наложения потоков для решения задач по совершенствованию формы всасывающего отверстия местного вентиляционного отсоса.

**Структура работы.** ИДЗ предусматривает изложение теоретических основ по определению осевой скорости вблизи всасывающих отверстий разной формы и расчет по определению осевой скорости вблизи всасывающих отверстий различной формы и определение наиболее дальнобойного отверстия, а также сравнение расчетных значений осевой скорости, найденных в рамках различных математических моделей.

**Оформление индивидуального домашнего задания.** ИДЗ предоставляется преподавателю для проверки в двух видах: отчет, на бумажных листах в формате А4, и в виде файлов, содержащих решение поставленной задачи на компьютере. Отчет индивидуального домашнего задания должен иметь следующую структуру: титульный лист; постановка задачи, результаты математического моделирования, предложения по совершенствованию системы обеспыливающей вентиляции. Срок сдачи ИДЗ определяется преподавателем.

### Пример выполнения теоретической части задания

Метод наложения потоков основывается на том, что вектор скорости сложного потенциального потока несжимаемой жидкости может быть представлен в виде суммы векторов скорости составляющих его потоков

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 + \vec{v}_3 + \dots + \vec{v}_n,$$

где  $n$  – количество складываемых потоков.

Это же утверждение справедливо для функций тока и потенциала сложного потока.

В инженерной практике встречается также иная модификация метода наложения потоков, не имеющего строгого математического и физического обоснования, однако имеющая неплохое совпадение с экспериментальными

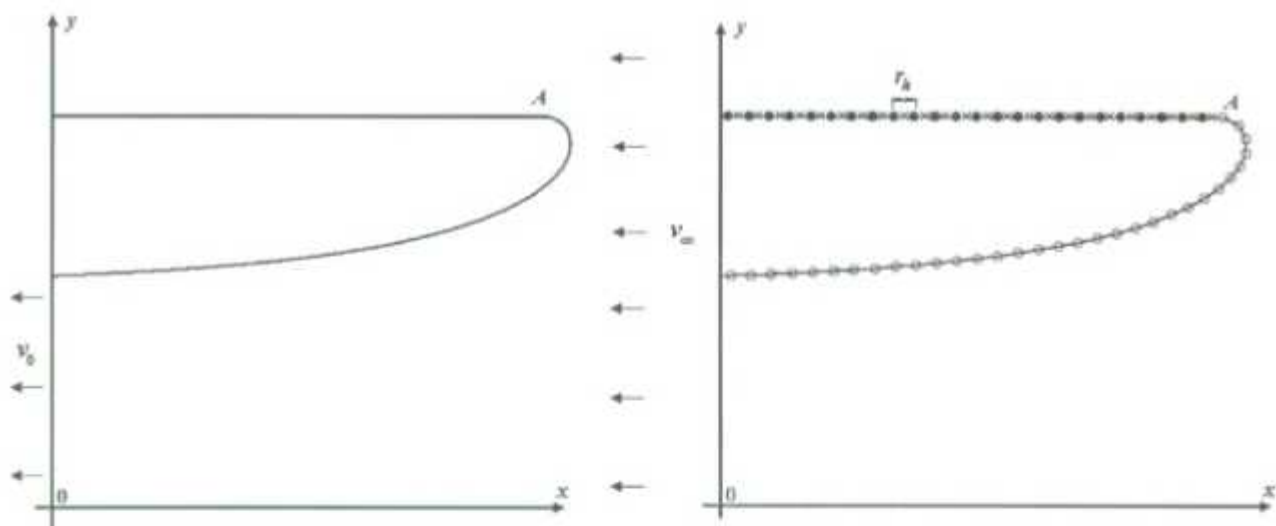


Рис.1. Отрывное течение на входе в круглый всасывающий канал:

а) к постановке задачи; б) дискретизация границы области

Обозначим через  $N$  - количество присоединенных вихревых колец;  $N_s$  - количество свободных вихревых колец;  $x^p$  - контрольная точка,  $p=1,2,\dots,N$ .

Скорость в произвольной точке  $x$  вдоль направления  $\vec{n}$  вычисляется с помощью формулы:

$$v_n(x) = \sum_{q=1}^N \Gamma(\xi^q) G(x, \xi^q) + \gamma \sum_{q=1}^{N_s} G(x, \zeta^q) + n_1 v_0, \quad (1)$$

где  $\xi^q$  - точка расположения  $q$ -го присоединенного вихревого кольца с циркуляцией  $\Gamma(\xi^q)$ ,  $\gamma = \text{const}$  - заданная циркуляция свободного вихревого кольца,  $\zeta^q$  - точка расположения  $q$ -го свободного вихревого кольца.

Функция  $G(x, \xi)$  выражает собой влияние на точку  $x$  вихревого кольца с единичной циркуляцией, расположенного в точке  $\xi$ .

$$G(x, \xi) = \frac{4(A_1 b + A_2 a) E(t)}{b(a-b)\sqrt{a+b}} - \frac{4A_2 F(t)}{b\sqrt{a+b}} \text{ при } b \neq 0, \quad G(x, \xi) = \frac{\xi_2^2 n_1}{2a\sqrt{a}} \text{ при } b = 0, \quad 2x_2 \xi_2 = b > 0,$$

$$a = (x_1 - \xi_1)^2 + \xi_2^2 + x_2^2 > 0, \quad A_1 = \frac{\xi_2^2 n_1}{4\pi}, \quad A_2 = \frac{\xi_2^2}{4\pi} [(x_1 - \xi_1) n_2 - x_2 n_1], \quad F(t) = \int_0^{t/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta}}, \quad t = 2b / (a+b)$$

$$E(t) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-t^2 \sin^2 \theta} d\theta; \quad F(t) = \sum_{i=0}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=0}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t}; \quad E(t) = 1 + \sum_{i=1}^4 c_i (1-t)^i + \sum_{i=1}^4 d_i (1-t)^i \ln \frac{1}{1-t};$$

$c_i, d_i$  взяты из таблиц [16].

Если расстояние от точки  $x$  до точки  $\xi$  меньше шага дискретности  $r_k$ , то данная функция вычисляется по формуле:  $G(x, \xi) = ((x_1 - \xi_1) n_2 - (x_2 - \xi_2) n_1) / (2\pi r_k^2)$ , где  $r_k$  - шаг дискретности (расстояние между соседними вихревыми кольцами). В случае  $x = \xi$  функция  $G(x, \xi) = 0$ .

Вычислительный алгоритм строится следующим образом. После задания точек расположения присоединенных вихрей и начального приближения для свободных вихрей формируется матрица  $G^{pq} = G(x^p, \xi^q)$ ;  $p=1,2,\dots,N$ ;  $q=1,2,\dots,N$ . Начинается первая итерация. Формируется столбец

свободных членов:  $v^p = -n_1 v_{\infty} - \gamma \sum_{q=1}^N G(x^p, \zeta^q)$ ,  $p=1, 2, \dots, N$ . Решается система линейных алгебраических уравнений:  $\sum_{q=1}^N \Gamma^{pq} G^{pq} = v^p$ ,  $p=1, 2, 3, \dots, N$ , откуда определяются неизвестные  $\Gamma^q = \Gamma(\xi^q)$ . Строится свободная линия тока, начиная с острой кромки  $A$ . С использованием формулы (1), при  $\vec{n} = \{1, 0\}$  вычисляется составляющая скорости  $v_x$ , при  $\vec{n} = \{0, 1\}$  - составляющая скорости  $v_y$ . Последующая точка  $(x', y')$  определяется из предыдущей  $(x, y)$  с использованием формул:  $x' = x + \Delta t v_x / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ ,  $y' = y + \Delta t v_y / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ , где  $\Delta t$  - шаг, который выбирается достаточно малым.

В случае достижения свободной поверхностью тока стенки патрубка, она отодвигается от стенки на расстояние шага дискретности.

Свободная поверхность тока будет состоять из свободных вихревых колец, удаленных друг от друга на расстояние шага дискретности  $r_h$ . То есть, в процессе вычислений, на каждом этапе проверяется расстояние до предыдущего свободного вихревого кольца. Как только в некоторой точке это расстояние становится равным, с точностью до малой погрешности, шагу дискретности, то в эту точку помещается следующее вихревое кольцо. Построение продолжается до сечения, в котором дискретная модель стенок патрубка прерывается.

На этом первая итерация заканчивается. Заметим, что значение  $N$ , при этом может измениться. Также задаются новые значения элементов массива расположения свободных вихревых колец, которые будут использоваться на следующей итерации.

Итерационный процесс заканчивается, если положение свободной поверхности тока в заданной внутри патрубка точки перестает изменяться с точностью до заданной погрешности. Либо можно задать фиксированное количество итераций, уточняющих положение свободной поверхности тока.

После находятся параметры отрывной области течения.

Средняя скорость внутри трубы определялась из выражения

$$v_0 = \frac{\pi \sum_{i=1}^N v_{\infty} (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{\pi R^2}, \quad (2)$$

где  $v_{\infty}$  - скорость в точке  $x = -5R$ ;  $y_i = y_{i-1} + h$ , где  $y_0 = 0$ ;  $y_N = R$ ,  $r_h = 0,0001$ . Суммирование в числителе (2) производилось до тех пор пока  $|y_i - R| > 0,0001$ .

Траектории пылевых частиц строились с использованием дифференциального уравнения ее динамики [7]:

$$\frac{\pi d_c^3}{6} \rho_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{\pi d_c^3}{6} \rho_p \vec{g} - \psi \chi S_m \rho_a \frac{|\vec{v}_p - \vec{v}_a| (\vec{v}_p - \vec{v}_a)}{2}, \quad (3)$$

где  $\vec{v}_a$  - скорость воздуха;  $\rho_a$  - плотность воздуха;  $\vec{v}_p$  - скорость частицы;  $\rho_p$  - плотность частицы;  $d_c$  - эквивалентный диаметр частицы;  $\vec{g}$  - ускорение свободного падения;  $S_m = \pi d_c^2 / 4$  - площадь миделевого сечения частицы;  $\chi$  - коэффициент ее динамической формы;  $\psi$  - коэффициент сопротивления воздуха, вычисляемый по формулам Стокса, Клячко, Адамова:

$\psi = 24 / \text{Re}$ , если  $\text{Re} < 1$ ;  $\psi = 24(1 + 1/6 \cdot \text{Re}^{2/3}) / \text{Re}$ , если  $1 \leq \text{Re} < 10^3$ ;  $\psi = 24 / \text{Re} \cdot (1 + 0,065 \text{Re}^{2/3})^{1,5}$ ,  
если  $\text{Re} \geq 10^3$ , где  $\text{Re} = \rho_a |\bar{v}_p - \bar{v}_a| d_p / \mu$ ,  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Уравнение (3) преобразуется к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

Определение предельной траектории осуществлялось следующим с использованием метода половинного деления. Задавался диаметр пылевой частицы, начальное ее положение  $y_1 = R$ ,  $y_2 = R$ . Начальные скорости полагались равными нулю. В переменную  $U_i$  помещалась ордината частицы, улавливаемой патрубок, а в переменную  $U_p$  – осаждающейся. В начальном приближении полагалось  $U_i = R$ ,  $U_p = 30R$ . Переменная  $S_r = (U_p + U_i) / 2$ . Далее организовывался цикл, который выполняется до тех пор пока истинно условие  $|U_p - U_i| > 0,00000001$ . Внутри организовывался цикл, где строились траектории частиц. Он выполнялся до тех пор, пока  $y_1 > -R/2$  и  $y_1 < 30R$ . При выходе из внутреннего цикла проверялось условие  $y_3 < 0$ . Если оно истинно, то переменная  $U_i = S_r$ , в противном случае  $U_p = S_r$ . Далее величины получают следующие значения:  $S_r = (U_p + U_i) / 2$ ,  $y_1 = R$ ,  $y_2 = S_r$ ,  $y_3 = 0$ ,  $y_4 = 0$ . На этом внешний цикл заканчивается. Описанный алгоритм верен, когда скорость набегающего восходящего потока выше скорости витания пылевых частиц. Пылевые частицы не будут улавливаться отсосом, если скорость их витания больше скорости восходящего воздушного потока. Только некоторые такие частицы с точкой вылета выше всасывающего отверстия улавливаются в результате совокупного действия спектра всасывания и набегающего потока.

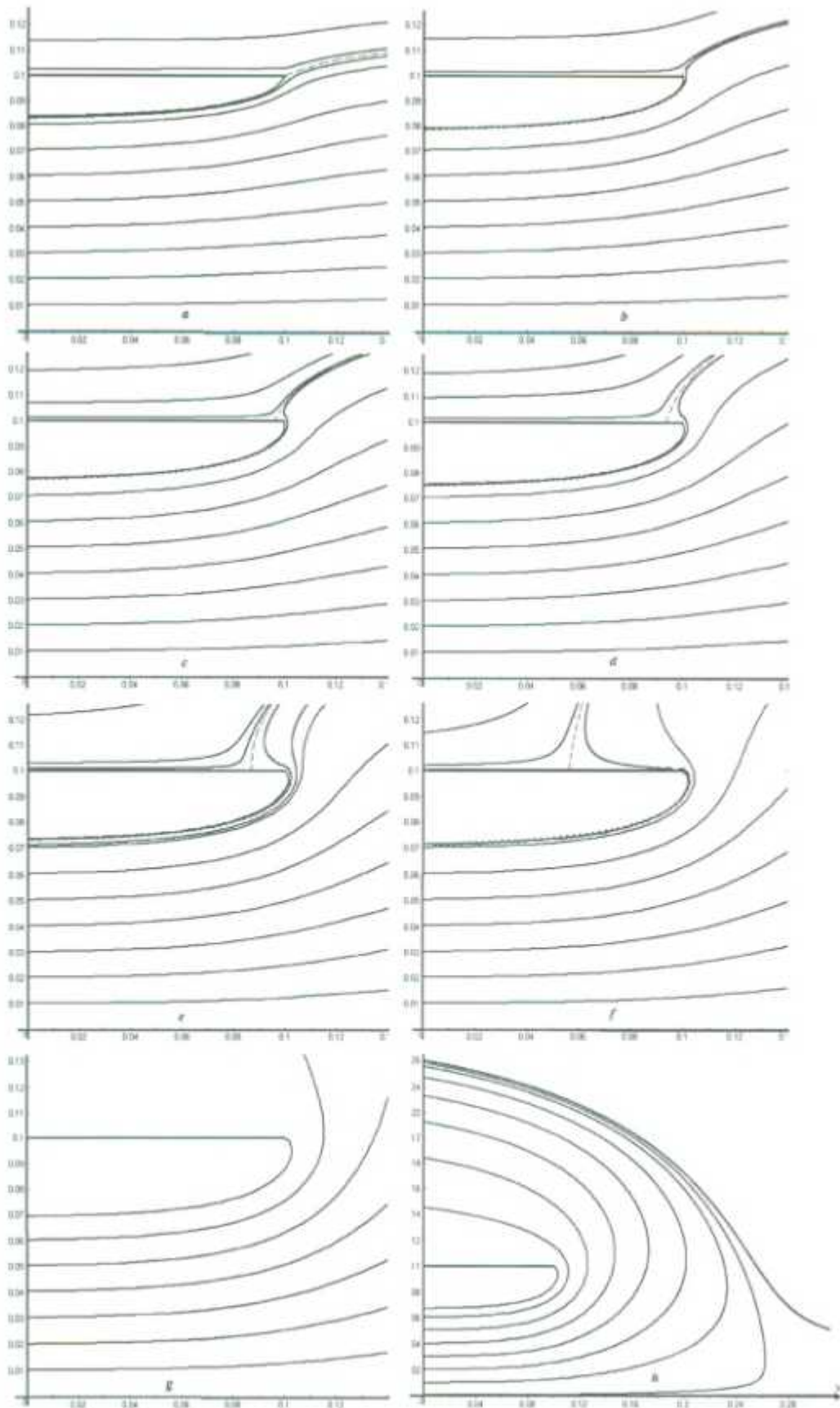


Рис.2. Линии тока на входе в патрубок при разных скоростях набегающего потока: а)  $v_{in} = 4$ ;  $\bar{v} = 0,737$ ; б)  $v_{in} = 2,5$ ;  $\bar{v} = 0,518$ ; в)  $v_{in} = 2$ ;  $\bar{v} = 0,425$ ; д)  $v_{in} = 1,5$ ;  $\bar{v} = 0,518$ ; е)  $v_{in} = 1$ ;  $\bar{v} = 0,334$ ; ф)  $v_{in} = 0,5$ ;  $\bar{v} = 0,0629$ ; г)  $v_{in} = 0$ ; з)  $v_{in} = -0,5$ ;  $\bar{v} = -0,062$

### Результаты расчета и их обсуждение

Картини течения при разных скоростях набегающего потока изображены на рис.2. Пунктиром изображено примерное положение разделительной линии тока. Как видно, при увеличении скорости набегающего потока (рис.2.a-f) и стремлении отношения скоростей  $\bar{v} = v_{\infty} / v_0 \rightarrow 1$ , точка деления линий тока стремится к острой кромке  $A$ . При отсутствии набегающего потока, либо в случае нисходящего потока, такой разделительной линии тока нет (рис.2.g-h).

Зависимости радиуса эффективного всасывания и коэффициента сжатия струи практически линейны относительно  $\bar{v}$  :

$$\bar{R}_{ef} = 0,218173\bar{v} + 0,8745998, \text{ при } -0,2 < \bar{v} \leq 0,574 \text{ и } \bar{R}_{ef} = 1 \text{ при } 0,574 < \bar{v} \leq 1, \quad (4)$$

$$\bar{\delta}_s = 0,1823056\bar{v} + 0,6899966 \text{ при } -0,2 < \bar{v} \leq 1. \quad (5)$$

Угол между прямыми (4) и (5) порядка 5 градусов. На рис.3 приведена для сравнения ширина эффективного всасывания для щелевидного всасывающего отверстия [1].

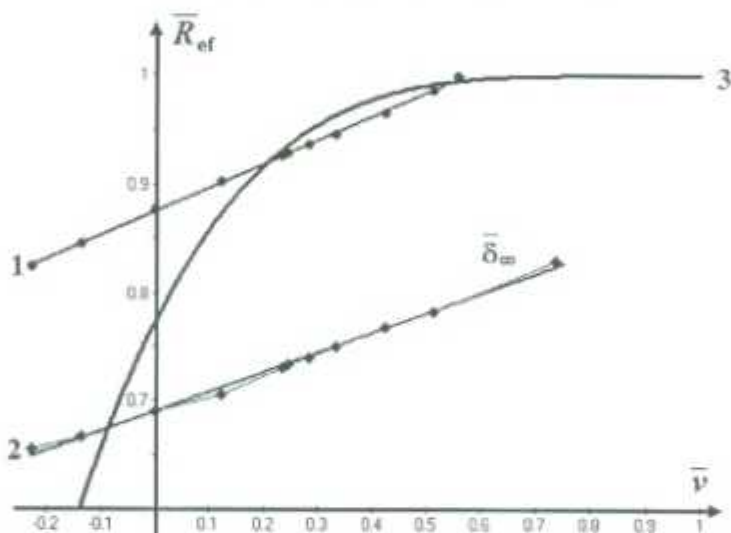


Рис.3. Зависимость эффективного радиуса патрубка от величины  $\bar{v} = v_{\infty} / v_0$ : 1 – изменение безразмерной величины эффективного радиуса  $\bar{R}_{ef} = R_{ef} / R$ ; 2 – изменение коэффициента сжатия струи  $\bar{\delta}_s = \delta_s / R$ ; 3 – изменение безразмерной величины эффективного всасывания для щелевидного отверстия [1]

Предельные траектории (рис.4) имеют параболическую форму, но ветви параболы могут быть направлены в разные стороны. При малых скоростях набегающего потока (рис.4 а) ветви предельных траекторий частиц диаметрами 40мкм, 50мкм, 80 мкм направлены вдоль стенок патрубка, т.е. по направлению потока. При увеличении скорости набегающего потока до 0,25м/с, такая траектория остается только для частиц диаметром 80 мкм (рис.4 б). В остальных представленных расчетах ветви направлены в противоположную сторону.

Как видно из рис.5 коэффициент аспирации  $A = (R_p / R)^2 \bar{v}$  имеет разный характер поведения в зависимости от диаметров пылевых частиц и скорости набегающего потока. Он может возрастать (кривые 1-2), иметь немотонный характер (кривая 3) и убывать (кривая 4) при возрастании диаметра пылевых частиц.



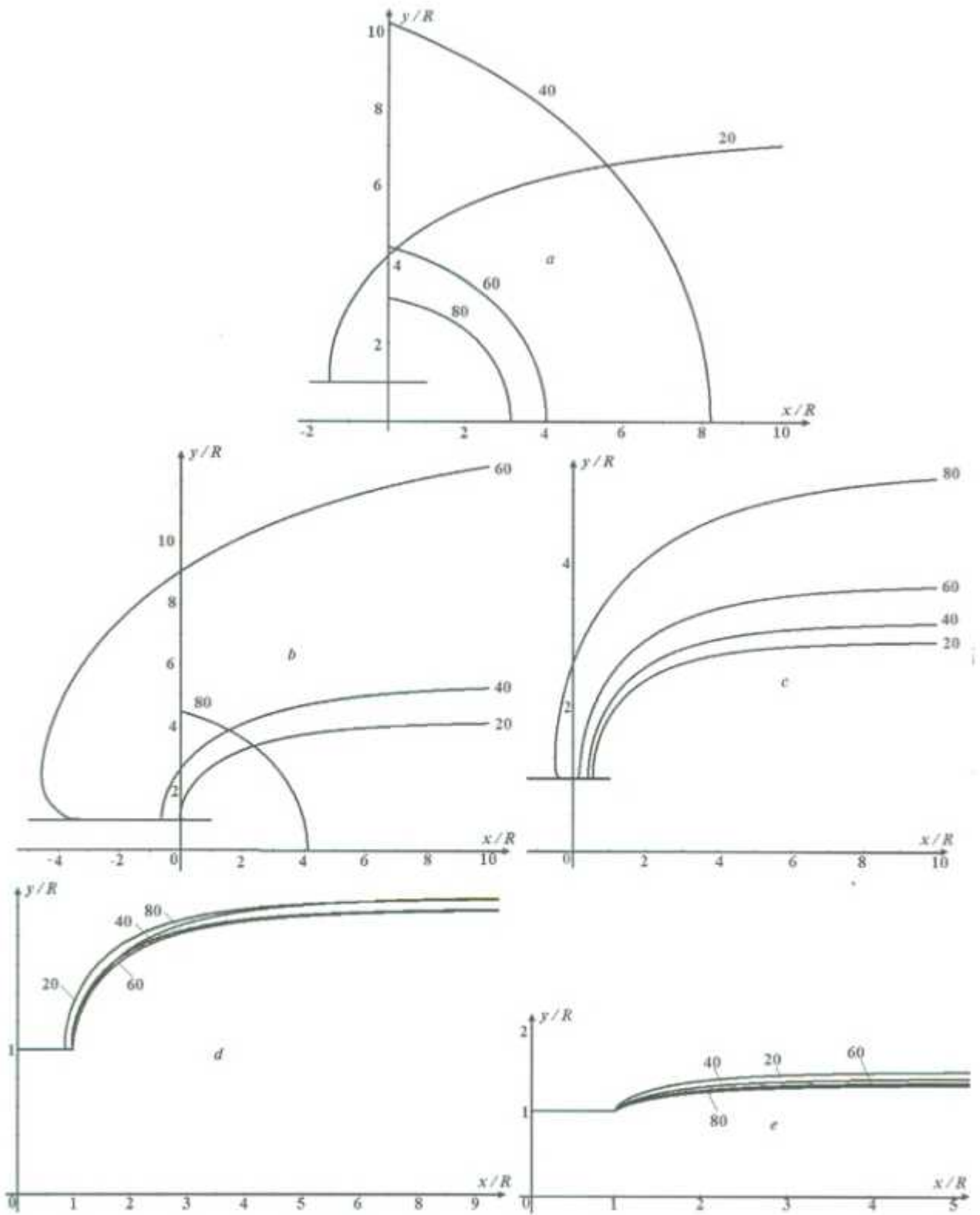


Рис.4. Предельные траектории пылевых частиц: а)  $v_w = 0,1$ ;  $\bar{v} = 0,0257$ ;

б)  $v_w = 0,25$ ;  $\bar{v} = 0,0632$ ; в)  $v_w = 0,5$ ;  $\bar{v} = 0,0629$ ; д)  $v_w = 1$ ;  $\bar{v} = 0,127$ ; е)  $v_w = 2$ ;  $\bar{v} = 0,425$

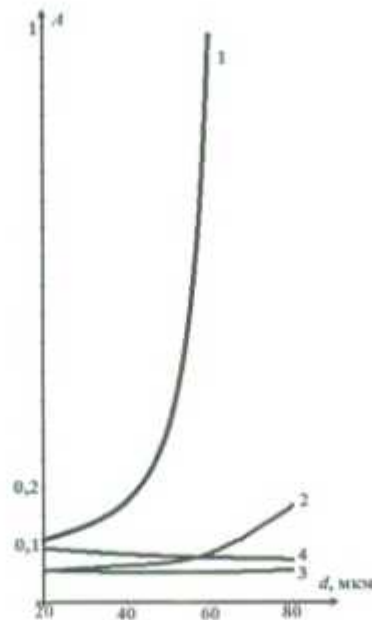


Рис. 5. Зависимость коэффициента аспирации от диаметра пылевых частиц при разных скоростях набегающего потока: 1 -  $\bar{v} = 0,0632$ ; 2 -  $\bar{v} = 0,0629$ ; 3 -  $\bar{v} = 0,127$ ; 4 -  $\bar{v} = 0,425$

### Выводы

Найденные зависимости радиуса эффективного всасывания, коэффициента сжатия струи и формы отрывной области, а также некоторые полученные сведения о поведении пылевых частиц на входе в круглый всасывающий канал, могут быть полезны при решении задач аэродинамики обеспыливающей вентиляции.

В данной работе не удалось рассмотреть случай, когда набегающий поток имеет скорость выше, чем скорость во всасывающем канале. Для этого случая необходимо изменение математической модели. При задании величины скорости во всасывающем канале, а не циркуляции на свободной линии тока, данную задачу возможно решить.

## 5.4. Перечень контрольных работ.

Не предусмотрены

## 7. ОСНОВНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

### 6.1. Перечень основной литературы

1. Аверкова, О.А. Вычислительный эксперимент в аэродинамике вентиляции / О. А.Аверкова; БГТУ им. В. Г. Шухова - Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. - 109с.

<https://elib.bstu.ru/Reader/Book/2013040917451329503300006246>

2. Математическое моделирование процессов в системах аспирации [Электронный ресурс] : учеб. пособие. Ч. I; Ч. II / О. А. Аверкова, К. И. Логачёв. - Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2007.

<https://elib.bstu.ru/Reader/Book/2013040918051481673700006545>

3. Логачев, К.И. Математические модели и численные методы САПР систем ТГВ / К. И. Логачев, О. А. Аверкова; БГТУ им. В. Г. Шухова. - Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2013. - 154 с.

## 6.2. Перечень дополнительной литературы

1. Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике: учеб. / В. С. Зарубин; ред.: В. С. Зарубин, А. П. Крищенко. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 495 с.
2. Пирумов, У. Г. Численные методы: учебное пособие / У. Г. Пирумов. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Дрофа, 2003. - 221 с.
3. Аверченков В.И. Основы математического моделирования технических систем [Электронный ресурс]: учебное пособие/ В.И. Аверченков — Брянск: Брянский государственный технический университет, 2012.— 271с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/7003>
4. Янилкин Ю.В., Стаценко В.П., Козлов В.И. Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Ю.В. Янилкин, В. П. Стаценко, В.И. Козлов — Саратов: Российский федеральный ядерный центр, 2009. — 508с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/18438>
5. Саталкина Л.В., Пеньков В.Б. Математическое моделирование: задачи и методы механики. [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Л.В. Саталкина, В.Б. Пеньков В.Б. — Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2013.: <http://www.iprbookshop.ru/22880>

## 6.3 Перечень интернет ресурсов

1. EqWorld Мир математических уравнений <http://eqworld.ipmnet.ru/>
2. Открытая Научная Интернет Библиотека <http://lib.e-science.ru/>
3. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
4. Российское образование ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ПОРТАЛ: <http://www.edu.ru/>
5. Сайт НеХудожественная Литература NeHudLit: <http://www.nehudlit.ru/books/subcat352.html>

## 8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Учебные аудитории для лекционных и практических занятий, оборудованные компьютерной и проекционной техникой.

Компьютерный класс; лабораторная работа по построению линий тока вблизи стоков, вихрей и диполей; лабораторная работа по вычислению заданного определенного интеграла; лабораторная работа по вычислению заданной системы обыкновенных дифференциальных уравнений; лабораторная работа по расчету

осевой скорости вблизи всасывающих отверстий; лабораторная работа по вычисление модуля и аргумента заданных комплексных чисел; лабораторная работа по определению осевой скорости вблизи щелевидных отсосов; определение осевой скорости вблизи щелевидных отсосов.

ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ, основанные на использовании методов сингулярных интегральных уравнений: Grohot; Spektr

## 8. УТВЕРЖДЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ

Утверждение рабочей программы без изменений

Рабочая программа без изменений утверждена на 2017 /2018 учебный  
год.

Протокол № 11 заседания кафедры от «24» 05 2017 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

подпись, ФИО

 Зхаров В.А.

Директор института \_\_\_\_\_

подпись, ФИО

 Зхаров В.А.

*Примечание: пункт 8. УТВЕРЖДЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ (на  
каждый учебный год) выполняются на отдельных листах.*

## 8. УТВЕРЖДЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ

Утверждение рабочей программы без изменений

Рабочая программа без изменений утверждена на 2018 /2019 учебный  
год.

Протокол № 11 заседания кафедры от «11» 05 2018 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

  
подпись, ФИО

Директор института \_\_\_\_\_

  
подпись, ФИО

*Примечание: пункт 8. УТВЕРЖДЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ (на  
каждый учебный год) выполняются на отдельных листах.*

## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Приложение №1.** Методические указания для обучающегося по освоению дисциплины (включая перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине).

Курс «Математическое моделирование внутренних инженерных сетей» представляет собой дисциплину по выбору обучающегося из профессионального цикла подготовки студентов по направлению «Строительство», направленности «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Целью преподавания дисциплины является обучение студентов основным математическим моделям и численным методам решения инженерных задач на ЭВМ, возникающим при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Знания численных методов и математических моделей необходимы для инженеров, работающих в области проектирования, строительства и эксплуатации систем теплогазоснабжения и вентиляции.

Изучение данной дисциплины дает знание основных методов расчета движения потенциальных течений жидкости и газа, нестационарных вихревых нестационарных течений, всасывающих факелов местной вытяжной вентиляции, прогнозирования дисперсного состава пыли, удаляемого из укрытий.

В процессе выполнения лабораторных занятий студент осваивает основы реализации математических моделей на ЭВМ и программирования различных численных методов, используемых при решении инженерных задач.

Занятия проводятся в виде лекций и лабораторных занятий. Важное значение для изучения курса имеет самостоятельная работа студентов.

Формы контроля знаний студентов предполагают текущий и итоговый контроль. Текущий контроль знаний проводится в форме систематических опросов, выполнения одного ИДЗ. Формой итогового контроля является зачет.

Исходный этап изучения курса предполагает ознакомление с *Рабочей программой*, характеризующей границы и содержание учебного материала, который подлежит освоению.

Изучение отдельных тем курса необходимо осуществлять в соответствии с поставленными в них целями, их значимостью, основываясь на содержании и вопросах, поставленных в лекции преподавателя и приведенных в планах и заданиях к лабораторным работам, а также методических указаниях для студентов заочного обучения.

В учебниках и справочных пособиях, представленных в *списке рекомендуемой литературы* содержатся возможные ответы на поставленные вопросы. Инструментами освоения учебного материала являются основные *термины и понятия*, составляющие категориальный аппарат дисциплины. Их осмысление, запоминание и практическое использование являются обязательным условием овладения курсом.

Для более глубокого изучения проблем курса при подготовке контрольных работ необходимо ознакомиться с публикациями в периодических изданиях. Поиск и подбор таких изданий, статей, материалов и монографий осуществляется на основе библиографических указаний и предметных каталогов.

Изучение каждой темы следует завершать выполнением практических заданий, ответами на вопросы, содержащихся в методических пособиях по курсу. Для обеспечения систематического контроля над процессом усвоения тем курса следует пользоваться перечнем контрольных вопросов для проверки знаний по дисциплине, содержащихся в планах и заданиях к лабораторным работам и методическим указаниям для студентов заочного отделения. Если при ответах на сформулированные в перечне вопросы возникнут затруднения, необходимо очередной раз вернуться к изучению соответствующей темы, либо обратиться за консультацией к преподавателю.

Успешное освоение курса дисциплины возможно лишь при систематической работе, требующей глубокого осмысления и повторения пройденного материала, поэтому необходимо делать соответствующие записи по каждой теме.

### **Раздел 1. Метод сеток, разностные схемы**

В разделе рассматриваются: основные понятия и определения; краевая задача для уравнения Пуассона; графическое представление решения.

**Термины и понятия:** краевая задача, уравнения Пуассона, разностные схемы, аппроксимация.

### **Раздел 2. Основные разностные схемы для решения нестационарного уравнения теплопроводности.**

В разделе рассматриваются: явная схема; неявная схема; решение уравнения теплопроводности с использованием явной схемы; решение уравнения теплопроводности с использованием неявной схемы.

**Термины и понятия:** уравнение теплопроводности, дискретный аналог, вычислительный алгоритм; явная схема; неявная схема; решение уравнения теплопроводности с использованием явной схемы; решение уравнения теплопроводности с использованием неявной схемы.

### **Раздел 3. Численное моделирование вихревых течений в закрытых вытяжных устройствах.**

Рассматриваются: вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в аспирационном укрытии; расчет поведения полифракционной пылевой аэрозоли, дисперсного состава и концентрации пылевых аэрозолей в аспирируемом воздухе; комбинация методов граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей; расчет течений в многосвязных областях с вращающимися цилиндрами-отсосами.

**Термины и понятия:** дисперсный состав и концентрация пылевых аэрозолей, полифракционная совокупность пылевых частиц; суперпозиция дискретных вихрей и источников (стоков).

### **Раздел 4. Численное моделирование вихревых течений в многосвязных областях с разрезами.**



Рассматриваются: вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в многосвязных областях с разрезами; условие Томпсона неизменности циркуляции; расчет течения на входе в щелевидные неплотности аспирационных укрытий; расчет течения на предприятиях агропромышленного комплекса.

**Термины и понятия:** нестационарные дискретные вихри; условие Томпсона, вычислительный алгоритм расчета вихревых течений в многосвязных областях с разрезами, микроклимат в зданиях и сооружениях.

### **Раздел 5. Численный метод дискретных вихревых многоугольников**

В разделе рассматривается: определение поля скоростей от вихревого отрезка; вихревые многоугольники; расчет вихревых течений на входе в квадратные и многоугольные всасывающие каналы; расчет экранированных вытяжных устройств; оптимизация вытяжных устройств по критерию дальнобойности.

**Термины и понятия:** вихревой отрезок, вихревой многоугольник, квазисосесимметричная задача, отрывная поверхность тока, размеры вихревых областей, профилирование.

### **Раздел 6. Метод дискретных стационарных вихрей**

В разделе рассматриваются: вычислительный алгоритм расчета на входе в щелевидный и круглый всасывающие каналы при задании величины постоянной циркуляции на свободной поверхности тока; вычислительный алгоритм расчета на входе в щелевидный и круглый всасывающие каналы при средней скорости всасывания; расчет изменения к.м.с. входа в неплотности щелевидной и круглой формы при их механическом экранировании; расчет течений на входе в отсосы-раструбы в неограниченном пространстве; расчет течений на входе в отсосы-раструбы над непроницаемой плоскостью; расчет течений на входе в круглый всасывающий патрубок при наличии набегающего потока; расчет течений на входе в отсосы-раструбы при наличии набегающего потока; задачи аспирации аэрозолей в пробоотборники; определение критических линий тока и предельных траекторий пылевых частиц, коэффициента аспирации; критерии эффективности отсоса-раструба.

**Термины и понятия:** стационарные дискретные вихри; отсос-раструб; отрывная поверхность тока, присоединенные вихри, свободные вихри; механическое экранирование, коэффициент аспирации, коэффициент улавливания, критерии эффективности отсоса-раструба.

## Утверждение рабочей программы без изменений

Рабочая программа без изменений утверждена на 2019/2020 учебный год.  
Протокол № 1 заседания кафедры от « 30 » августа 2019 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ В.А. Уваров

  
подпись, ФИО

Директор института

\_\_\_\_\_ В.А. Уваров

  
подпись, ФИО

## Утверждение рабочей программы без изменений

Рабочая программа без изменений утверждена на 2020/2021 учебный год.  
Протокол № 11 заседания кафедры от «21» мая 2020 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ В.А. Уваров

  
подпись, ФИО

Директор института \_\_\_\_\_ В.А. Уваров

  
подпись, ФИО

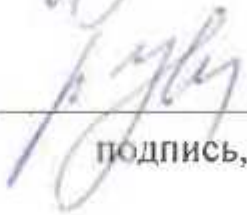
## Утверждение рабочей программы без изменений

Рабочая программа без изменений утверждена на 2021/2022 учебный год.  
Протокол № 12 заседания кафедры от «14» мая 2021 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ В.А. Уваров

  
подпись, ФИО

Директор института \_\_\_\_\_ В.А. Уваров

  
подпись, ФИО