

создание новой или модернизированной продукции, при проведении НИР и ОКР в процессе создания новой продукции, а также в процессе ее коммерческой реализации на внутреннем и/или зарубежном рынках вплоть до момента снятия ее с производства, когда эта продукция утрачивает свою конкурентоспособность.

Литература

1. ГОСТ Р 15. 011–96 «Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения».
2. Скорняков Э.П., Горбунова М.Э. Патентные исследования: учеб.-метод. пособие.- 2-е изд., испр.- М.: ИНИЦ «ПАТЕНТ», 2008.-165 с.
3. Скорняков Э.П., Горбунова М.Э. Виды патентных исследований и их связь с этапами создания продукции // Патентная информация сегодня. Информация, технологии, рынок. — 2009. — № 3. — С. 26-30.

Исследование элемента мультициклона для очистки газов

к.т.н. проф. Николайкина Н.Е., Завьялова М.С., Хуторов Ю.Ф.

Университет машиностроения
8(499)267-07-04, nikols_153@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований работы элемента мультициклона диаметром 0,05 м. Определены скорость газа, соответствующая началу автомобильного режима работы аппарата, фракционная эффективность улавливания пыли. Показана правомерность применения полученных ранее эмпирических зависимостей для расчета подобных пылеуловителей.

Ключевые слова: элемент мультициклона, экспериментальная установка, автомобильный режим, скорость, эффективность, расчетные зависимости

Циклоны относятся к аппаратам, наиболее часто применяемым для очистки выбросов от твердых взвешенных частиц (пылей) размером более 5 мкм. К достоинствам циклонов следует отнести отсутствие движущихся частей, легкость при необходимости защиты стенок аппарата от абразивных пылей или высокотемпературных газов, работа практически при постоянном гидравлическом сопротивлении, возможность работы как при повышенном давлении, так и при разряжении и т.д. Известно, что уменьшение диаметра циклона ведет к повышению эффективности очистки. Объединение большого числа малых циклонов в группу, т.е. создание батарейных циклонов, преследует именно эту цель. На практике используются батарейные циклоны (мультициклоны) с диаметром элементов от 0,1 до 0,25 м, работающие в диапазоне рабочих скоростей от 3,5 до 4,5 м/с.

В Институте инженерной экологии и химического машиностроения Университета машиностроения на экспериментальном стенде по заданию ООО «НПК «ОйлГазМаш» проведены испытания элемента мультициклона с диаметром свободного сечения 0,05м, предназначенного для очистки от взвешенных частиц природного газа под давлением.

Опытный образец элемента мультициклона (изображенный на рисунке 1) был установлен на экспериментальном стенде, принципиальная схема которого представлена на рисунке 2. Особенностью элемента мультициклона является двойной тангенциальный ввод газового потока в аппарат. Исследования проводились на воздухе при температуре ≈ 20 °С и барометрическом давлении, близком к нормальному.

При проведении испытаний с пылью (на запыленном воздухе) ее предварительно подогревали в муфельной печи (до 180-200 °С), а затем засыпали в обогреваемый бункер тарельчатого пылепитателя 3. Пыль с дозировочного стола пылепитателя попадала в эжектор, откуда транспортировалась воздухом в элемент мультициклона. Расход воздуха поддерживался равным 60 л/мин реометром 2.

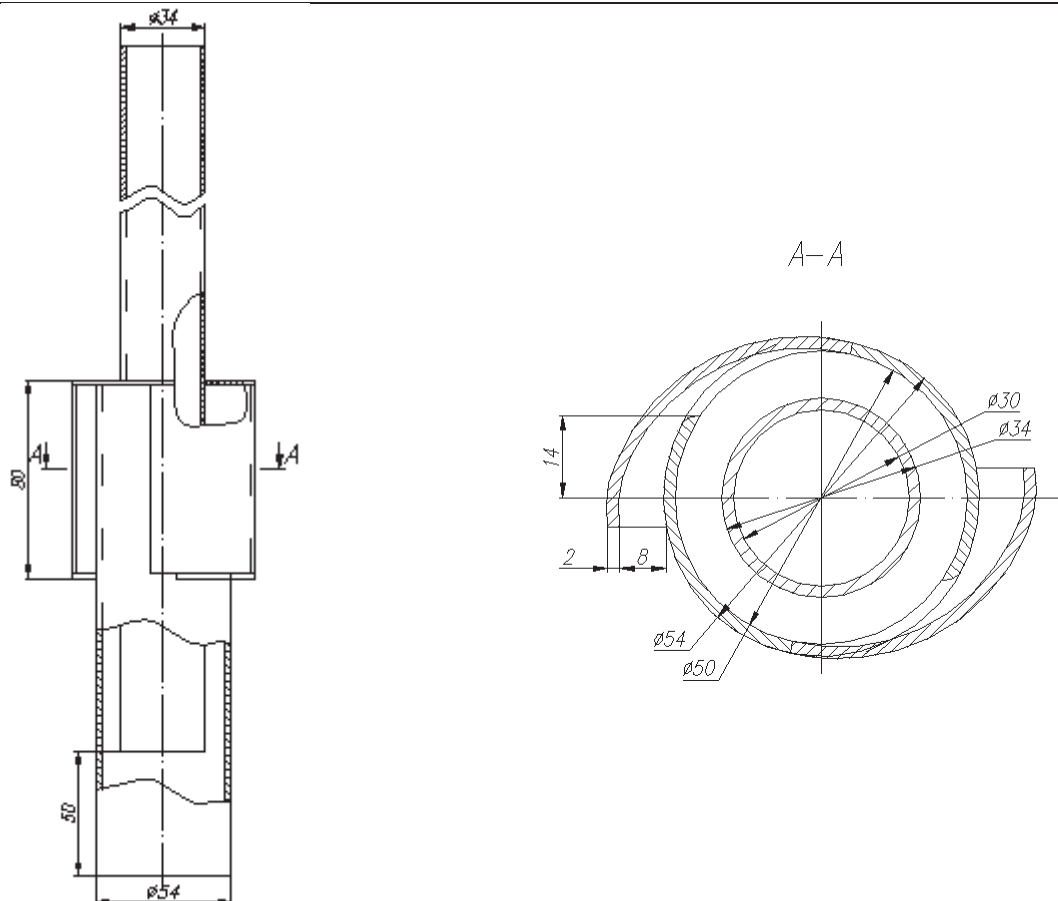


Рисунок 1. Элемент мультициклона

В качестве модельной пыли использовался «Пирант» плотностью $\rho_{\text{ч}} = 1870 \text{ кг/м}^3$. Уловленная пыль собиралась в герметичном бункере 10. Выгрузка пыли из бункера осуществлялась периодически при неработающем стенде.

В процессе проведения исследований определили параметры пылегазового потока на входе и выходе элемента мультициклона в точках 4 и 6, а именно: объемный расход воздуха, температуру, абсолютное давление, запыленность, дисперсный состав пыли. Все замеры проводили на основании стандартных методик [1-3].

На рисунке 3 приведена зависимость гидравлического сопротивления аппарата ΔP (Па) от скорости воздуха $v_{\text{г}}$ (м/с) в свободном сечении, а на рисунке 4 – зависимость коэффициента гидравлического сопротивления элемента мультициклона ζ также от величины $v_{\text{г}}$.

Из рисунка 4 следует, что автомодельный режим элемента мультициклона, для которого характерно постоянство величины значения ζ [5], устанавливается при значении $v_{\text{г}} \geq 5 \text{ м/с}$. Начиная с этой скорости можно принимать величину $\zeta = 95$.

Исследование запыленности газового потока проводилось при трёх различных значениях скоростей ($v_{\text{г}}$). Полученная зависимость эффективности пылеулавливания от скорости газа в свободном сечении аппарата приведена на рисунке 5. Как следует из графика, с увеличением скорости газа в свободном сечении аппарата несколько снижается эффективность пылеулавливания. Вероятно, это можно объяснить дроблением частиц пыли за счет высоких скоростей газового потока и вторичным уносом мелкодисперсной пыли.

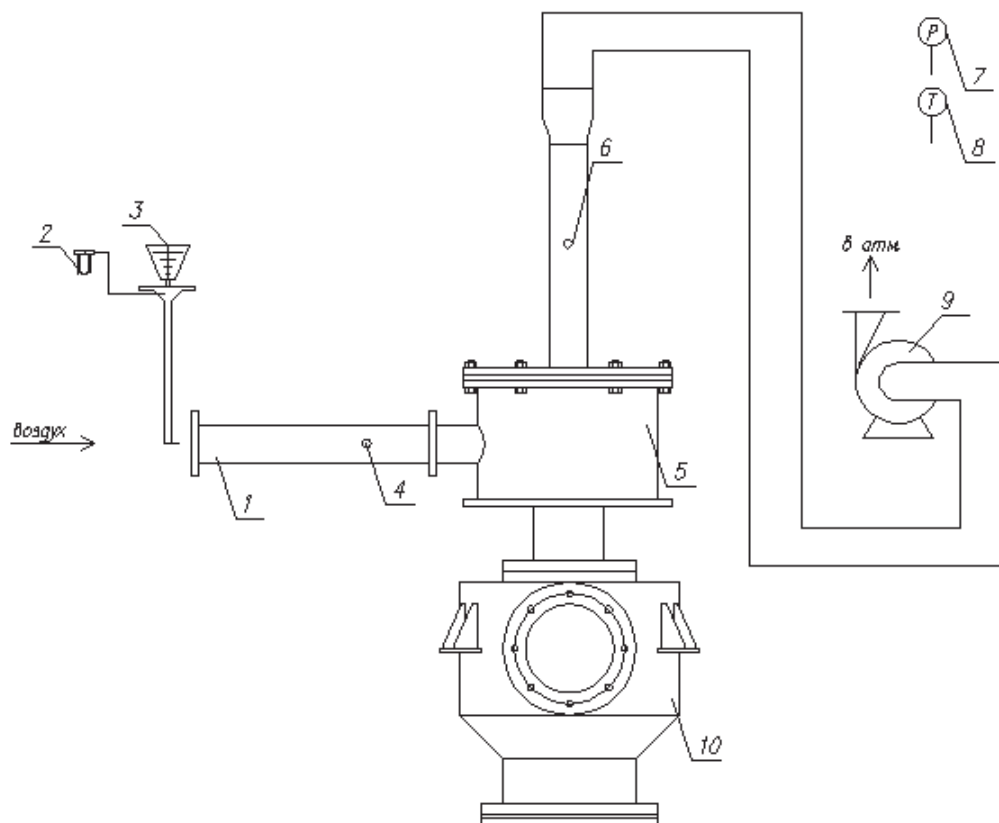


Рисунок 2. Схема экспериментального стенда: 1 – входной газопровод; 2 – реометр; 3 – тарельчатый пылепитатель; 4 – точка замера запыленности на входе; 5 – элемент мультициклона; 6 – точка замера запыленности на выходе; 7 – прибор для измерения барометрического давления (анероид); 8 – прибор для измерения температуры воздуха (термометр); 9 – вентилятор; 10 – бункер циклона

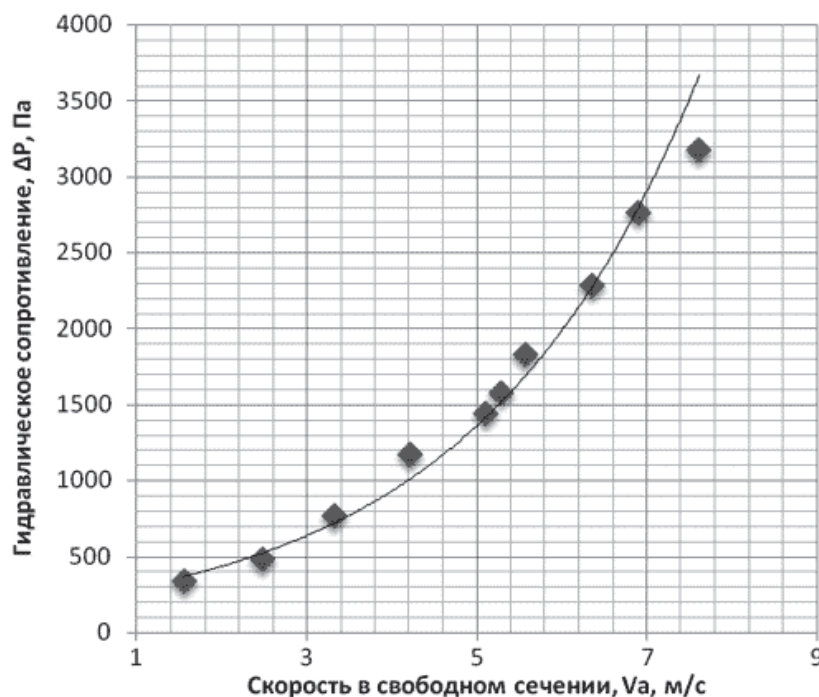


Рисунок 3. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газа в свободном сечении аппарата

Исследования дисперсного состава пыли проводились при $v_r = 5,6$ м/с. Полученные интегральные распределения дисперсного состава пыли (по массе) на входе и выходе из циклона позволили определить медианный размер частиц на входе d_m' (мкм) и выходе аппарата d_m'' (мкм) и величины логарифма среднеквадратичного отклонения в функции массового распределения частиц по размерам $lg\sigma_{ч}'$ и $lg\sigma_{ч}''$. Получены значения $d_m' = 9$ мкм и $lg\sigma_{ч}' = 0,41$; $d_m'' = 2,4$ мкм и $lg\sigma_{ч}'' = 0,36$.

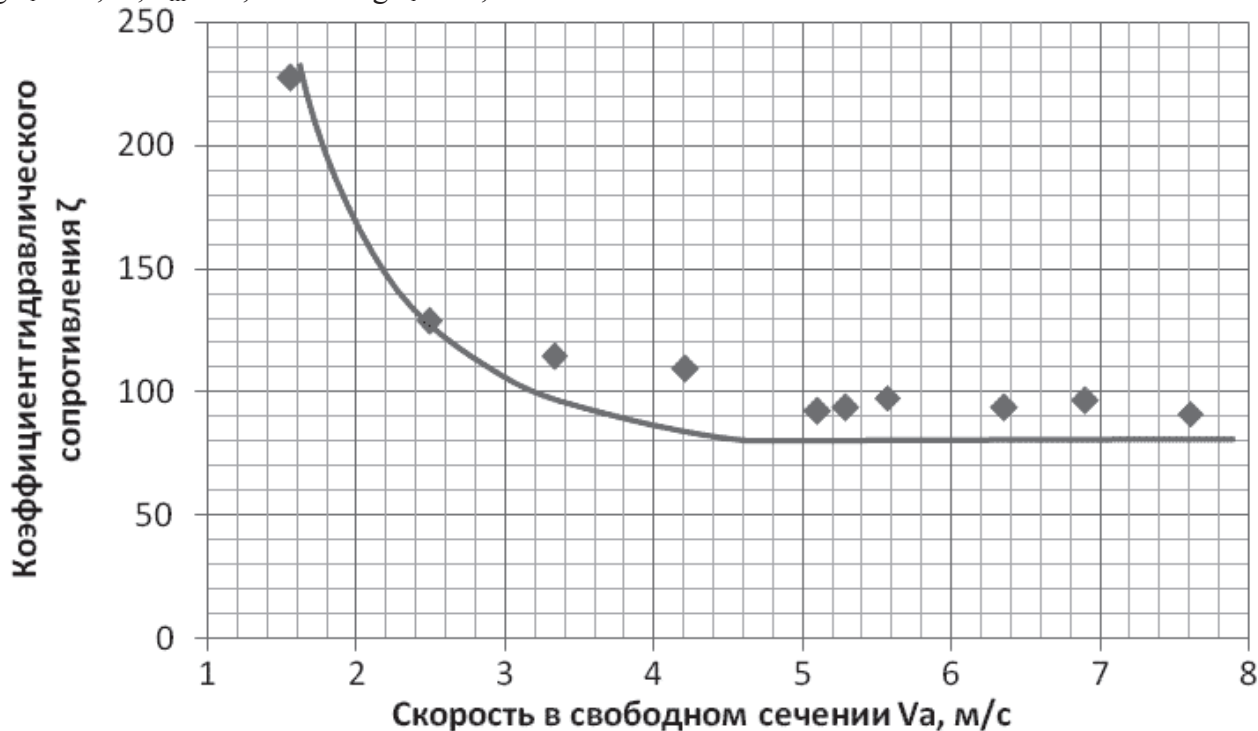


Рисунок 4. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости газа в свободном сечении аппарата

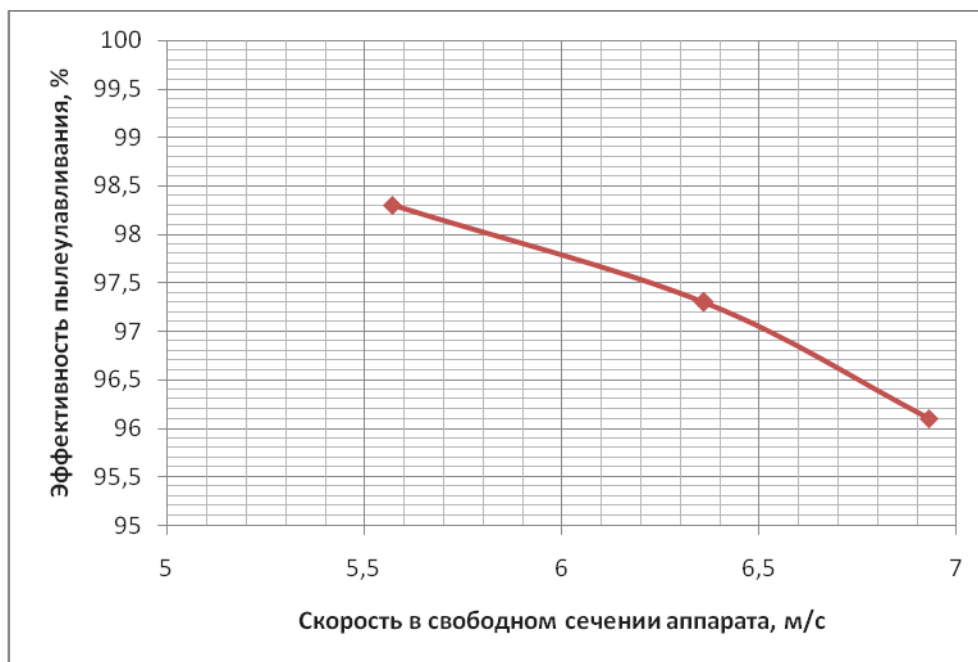


Рисунок 5. Зависимость эффективности пылеулавливания от скорости воздуха в свободном сечении аппарата

На основе данных о дисперсном составе пыли на входе и выходе из циклона была построена кривая фракционной эффективности элемента мультициклона, которая подтверждает характерное для инерционных пылеуловителей, в том числе циклонов, подчинение фракционной эффективности улавливания взвешенных частиц логарифмически-нормальному закону распределения.

Полученные данные позволяют определить диаметр частиц, улавливаемых в циклоне с эффективностью, равной 50%, d_{50} (мкм), и величину логарифма среднеквадратичного отклонения в функции распределения значений фракционного коэффициента пылеулавливания $\lg \sigma_\eta$. Эти величины составляют: $d_{50} = 0,3$ мкм и $\lg \sigma_\eta = 0,56$.

Согласно теории инерционного осаждения взвешенных частиц, подтвержденной целым рядом исследований, например [6], величина d_{50} для центробежного пылеуловителя, работающего в автоточном режиме, т.е. при $\zeta = \text{const}$, рассчитывается по формуле, действительной в интервале ζ от 8,5 до 4420.

$$d_{50} = 14,5 \cdot 10^5 \zeta^{-0.5} \sqrt{\frac{D\mu}{v_a \rho_p}}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха при температуре в рабочих условиях, Па·с.

Учитывая, что полученные значения массового распределения взвешенных частиц по размерам на входе в аппарат и фракционной эффективности подчиняются логарифмически-нормальному закону распределения, расчет эффективности циклона может быть проведен с помощью интеграла вероятности [4, 6]:

$$x = \frac{\lg d_m/d_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\zeta}} = \frac{\lg 9,0/0,3}{\sqrt{0,56^2 + 0,41^2}} = 2,13. \quad (2)$$

Согласно таблице значений интеграла вероятности [4], величина x соответствует значению эффективности $\eta_{теор} \approx 0,989$, что демонстрирует хорошую сходимость с результатами эксперимента.

Сравнивая результаты, полученные при испытании элемента мультициклона диаметром 0,05 м с данными, полученными ранее [7] на том же экспериментальном стенде для элемента мультициклона диаметром 0,1 м с двойным подводом газового потока из цилиндрической камеры, можно отметить, что диаметр частиц, улавливаемых на 50%, составил 0,3 мкм против 1,7 мкм, а средняя экспериментальная эффективность повысилась с 0,905 до 0,983. В то же время коэффициент гидравлического сопротивления, соответствующий началу автоточного режима, вырос с $\zeta = 40$ до $\zeta = 95$, что свидетельствует о повышении энергоемкости аппарата в целом.

Выводы

Подтверждена возможность расширения диапазона эффективной работы циклонов (элементов мультициклонов) до скоростей 7 м/с.

Экспериментально подтверждена возможность применения для оценки эффективности элементов мультициклона в исследованном диапазоне изменения рабочих условий существующих расчетных зависимостей.

Литература

1. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.
2. ГОСТ 17.2.4.07-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газовых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.

3. ГОСТ Р 50820-95. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Метод определения запыленности газопылевых потоков.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под общей ред. А.А.Русанова. М.: Энергоатомиздат, 1983 – 312 с.
5. Вальдберг А.Ю., Николайкина Н.Е. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Защита атмосферы. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.
6. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Яламов Ю.И. Теоретические основы охраны атмосферного воздуха от загрязнения промышленными аэрозолями. – С-Пб, МП «НИИОГАЗ-ФИЛЬТР» - СПб ГТУ РП, 1993. – 235с.
7. Вальдберг А.Ю., Голубева М.В., Хуторов Ю.Ф., Горецкий Р.С. Исследование элемента мультициклона // Химическое и нефтегазовое машиностроение, № 7, 2012. – С. 6.

Асимптотики решений дифференциального уравнения с вырождением

к. ф.-м. н. доцент Кузнецов В.В., к.ф.-м. н. доцент Кузнецова Н.А.*

НИУ «Высшая школа экономики»,

*Государственный университет по землеустройству

kuznetsovanata@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения асимптотического метода Вентцеля - Крамерса - Бриллюэна (ВКБ) решения обыкновенных дифференциальных уравнений с малым параметром при старшей производной для построения и оценки решений одного класса вырождающихся обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, содержащих большой числовой параметр.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение, вырождение, асимптотические представления

Исследование вырождающихся эллиптических уравнений приводит к необходимости изучения свойств решений обыкновенных вырождающихся дифференциальных уравнений с вещественными параметрами. Ряд свойств таких решений был установлен в работах [1,3]. Дальнейшее продвижение в указанном направлении требует более тонких методов для исследования свойств решений граничных задач вблизи поверхности вырождения. Основой такого подхода могут стать асимптотические методы. Целью настоящей работы является изучение свойств решений обыкновенного сильно вырождающегося дифференциального уравнения второго порядка, содержащего большой числовой параметр на основе не связанного со специфическими свойствами гильбертовых пространств подхода, в основу которого положен асимптотический метод ВКБ.

Рассмотрим вырождающееся обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\alpha^2(t)y''(t) - (-1)^j(b(t) + ikf(t)\alpha(t))y'(t) - k^2c(t)y(t) = 0, \quad (1)$$
$$j = 0,1, \quad t \in (0, \delta),$$

содержащее большой числовой параметр $k \in R_1^+$.

Предположим, что коэффициенты уравнения удовлетворяют следующим условиям:

$$\alpha(t) \in C^4(0, \infty); \quad b(t), f(t) \in C^3(0, \infty); \quad c(t) \in C^2(0, \infty); \quad (2)$$

$$c(t) - \frac{1}{4} f^2(t) > 0; \quad b(0) = 1; \quad (3)$$

$$\alpha(0) = \alpha'(0) = 0, \quad \alpha(t) > 0 \text{ при } t > 0; \quad \alpha(t) = \alpha_0 \text{ при } t \geq \delta > 0. \quad (4)$$

Предположим также, что существуют $t_0 \in (0, \delta)$ и $N > 1$ такие, что

$$\alpha(t) \in C^{N+1}(0, t_0), \quad \alpha^{(N)}(0) \neq 0. \quad (5)$$

Докажем, что при выполнении сформулированных условий, при $t \in (0, \delta)$ существует достаточно большое число $k_0 > 0$ такое, что при $k \geq k_0$ рассматриваемое уравнение имеет два линейно независимых решения $y_{nj}(t)$, $n = 1, 2$, $j = 0, 1$. Для этих решений и их производных первого порядка получим следующие асимптотические представления

$$y_{nj}(t) = y_{nj}^0(t, k)(1 + \varepsilon_{nj}(t, k)). \quad (6)$$

$$y'_{nj}(t) = y'_{nj}{}^0(t, k)P_{nj}(t, k)(1 + \varepsilon_{nj}^*(t, k)). \quad (7)$$

где

$$y_{nj}^0(t, k) = Q_j^{-\frac{1}{4}}(\tau, k) \exp \left\{ \int_0^\tau \left((-1)^{j+1} \frac{1}{2} \beta_j(\tilde{\tau}, k) + (-1)^{n+1} \sqrt{Q_j(\tilde{\tau}, k)} \right) d\tilde{\tau} \right\}, \quad (8)$$

$$P_{nj}(t, k) = \alpha^{-1}(t) \left[(-1)^{j+1} \frac{1}{2} \beta_j(\tau, k) + (-1)^{n+1} Q_j^{\frac{1}{2}}(\tau, k) - \frac{1}{4} Q_j^{-1}(\tau, k) Q_j'(\tau, k) \right]. \quad (9)$$

$$\tau = \tau_\delta(t) = \int_\delta^t \alpha^{-1}(\rho) d\rho, \quad \tau \in (-\infty, 0). \quad (10)$$

Функции $\beta_j(\tau(t), k)$ и $Q_j(\tau(t), k)$ выражаются через коэффициенты исследуемого уравнения:

$$\beta_j(\tau(t), k) = (b(t) + ikf(t)\alpha(t))\alpha^{-1}(t) - (-1)^j \alpha'(t), \quad (11)$$

$$Q_j(\tau(t), k) = \frac{1}{4} \beta_j^2(\tau, k) + k^2 c(t) + (-1)^j \frac{1}{2} \beta_{j\tau}'(\tau, k). \quad (12)$$

Для функции $\varepsilon(t, k)$ и $\varepsilon^*(t, k)$, также получим асимптотические представления при $t \in (0, \delta)$ и достаточно большом k .

При доказательстве полученных асимптотических представлений и оценок использовался асимптотический метод ВКБ [2]. С целью обоснования применимости этого метода к вырождающемуся обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка (1) рассмотрим уравнение

$$z''(t) - Q(t)z(t) = 0, \quad t \in (a, b). \quad (13)$$

Функция $Q(t)$ удовлетворяет условиям:

$$Q(t) \in C^2((a, b)), \quad Q(t) \neq 0 \quad \text{при } t \in (a, b); \quad (14)$$

$$Q^{\frac{1}{2}}(t) \in C^2((a, b)), \quad \operatorname{Re} Q(t) \geq 0 \quad \text{при } t \in (a, b). \quad (15)$$

$$\rho(h_n, t) = \left| \int_{h_n}^t |\alpha_1(t)| dt \right| < \infty \quad \text{при } t \in (a, b), \quad h_n = \begin{cases} a, & n = 1 \\ b, & n = 2 \end{cases}, \quad (16)$$

$$\text{где } \alpha_1(t) = \frac{1}{8} Q''(t) Q^{-\frac{3}{2}}(t) - \frac{5}{32} (Q'(t))^2 Q^{-\frac{5}{2}}(t). \quad (17)$$

В [2] установлено существование и единственность решений $V_1^n(t)$ и $V_2^n(t)$, $n = 1, 2$, $t \in (a, b)$, систем интегральных уравнений

$$\begin{cases} V_1^1(t) = 1 + \int_a^t \alpha_1(\xi) [V_1^1(\xi) + V_2^1(\xi)] d\xi, \\ V_2^1(t) = - \int_a^t \exp \left\{ 2 \int_t^\xi Q^{\frac{1}{2}}(\zeta) d\zeta \right\} \alpha_1(\xi) [V_1^1(\xi) + V_2^1(\xi)] d\xi, \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} V_1^2(t) = - \int_t^b \exp \left\{ - 2 \int_t^\xi Q^{\frac{1}{2}}(\zeta) d\zeta \right\} \alpha_1(\xi) [V_1^2(\xi) + V_2^2(\xi)] d\xi, \\ V_2^2(t) = 1 - \int_t^b \alpha_1(\xi) [V_1^2(\xi) + V_2^2(\xi)] d\xi, \end{cases} \quad (19)$$

для которых справедливы оценки

$$|V_1^1(t) - 1| \leq \exp \{ 2\rho(a, t) \} - 1, \quad |V_2^1(t)| \leq \exp \{ 2\rho(a, t) \} - 1, \quad (20)$$

$$|V_1^2(t)| \leq \exp \{ 2\rho(b, t) \} - 1, \quad |V_2^2(t) - 1| \leq \exp \{ 2\rho(b, t) \} - 1, \quad (21)$$

$$|V_1^n(t) + V_2^n(t)| < \infty, \quad n = 1, 2. \quad (22)$$

Лемма 1. При выполнении условий (14) – (16) для решений $z_n(t)$, $n = 1, 2$, уравнения (13) и их производных справедливы асимптотические представления

$$z_n(t) = z_n^0(t)(1 + \varepsilon_n(t)), \quad (23)$$

$$z_n'(t) = z_n^0(t) \left[(-1)^{n+1} Q^{\frac{1}{2}}(t) - \frac{1}{4} Q'(t) Q^{-1}(t) \right] (1 + \varepsilon_n^0(t)), \quad (24)$$

$$z_n^0(t) = Q^{-\frac{1}{4}}(t) \exp \left\{ (-1)^{n+1} \int_{t_0}^t Q^{\frac{1}{2}}(\xi) d\xi \right\}, \quad t_0 \in (a, b) \quad (25)$$

$$\varepsilon_n(t) = V_1^n(t) + V_2^n(t) - 1, \quad (26)$$