

---

---

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

---

---

УДК 621.431.74-729.3

**С.П. Бойко**

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОТЕЧНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ФИЛЬТРОВ ТОПЛИВНЫХ И СМАЗОЧНЫХ СИСТЕМ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Приводится методика расчета процесса регенерации обратным потоком промывной жидкости самоочищающихся фильтров (СОФ) топлив и масла. Рассмотрено гидродинамическое воздействие на отложившуюся в капилляре (поре) фильтровального материала частицу загрязнений. Выведено условие отрыва ее от ложи поры за счет подъемной силы, вызываемой потоком промывной жидкости. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту регенерации СОФ при разных значениях гидродинамических, адгезионных и седиментационных компонентов процесса.*

**Ключевые слова:** самоочищающийся фильтр, регенерация фильтра, очистка топлива и масла, фильтрование, промывка фильтрующих элементов.

**S.P. Boyko**

## CALKULATION OF EFFICIENCY OF REGENERATION OF SELF-CLEANING FILTER USED IN FUEL AND LUBRICANT SYSTEMS OF SHIP DIESEL ENGINES

*Given the method of calculation of the process of regeneration with return stream washing of lavage fluid self-cleaning filter (SCF) fuel and oil. Considered hydrodynamic influence on the deposited in the capillary filter material particle contamination. Concluded the condition of the tearing it off from the boxes pores at expense of lifting force made by the stream of the washing liquid. Carried out comparison of calculation and experimental data by the coefficient of regeneration with different values hydrodynamic adhesive and sedimentation components of the process.*

**Key words:** self-cleaning filter, regeneration of the filter, cleaning of fuel and oil, filtering, washing of the filtering elements.

В последние годы для очистки топлив и моторных масел на судах широкое распространение получили саморегенерирующиеся фильтры. Особенность функционирования их состоит в том, что фильтрующие элементы (ФЭ) этих очистителей длительно сохраняют свои рабочие характеристики за счет удаления накапливающихся в них загрязнений потоком промывной жидкости. В качестве промывной среды используется фильтруемое топливо или масло.

Для повышения эффективности процесса регенерации самоочищающихся фильтров (СОФ) обратным потоком фильтруемой жидкости необходимо увеличивать его скорость. Целью данной статьи является расчет величины скорости промывного потока СОФ, которая обеспечит требуемое качество регенерации. Коэффициент эффективности противотечной регенерации СОФ должен быть таковым, чтобы обеспечивалась длительная работа очистителя в течение 2–4 тыс. ч без его вскрытия для проведения химической очистки ФЭ.

Попытка идентифицировать процесс регенерации, рассмотрев силы, действующие на отфильтрованную частицу, в том числе вызываемые промывным потоком, представлена в исследованиях [1, 2]. Стохастическая модель регенерации СОФ, которая описана в отчете по НИР [1], довольно сложна. Реализация ее в расчетах эффективности промывки фильтра и дает завышенные значения коэффициента регенерации  $\phi_{pg}$ , особенно при рассмотрении удаления мелкодисперсной фазы загрязнений. В статье сделана попытка уточнения модели регенерации с использованием детерминированного подхода и представлений, приведенных в работах [1, 2].

Для расчета вероятности удаления отложившейся частицы загрязнений путем отрыва ее промывным потоком от ложи поры составляли баланс действующих на нее сил и моментов. Вследствие сложности учета связи дисперсной фазы с поверхностью капилляра (поры), а также учета влияющих на частицу и зависящих от ее формы лобовой и подъемной сил рассматриваются  $F_i$  в момент отрыва.

Удаление дисперсной фазы из капилляра имеет вероятностную природу. Особенно сложно учесть повторные осаждения на поверхность капилляра взвешенной, оторвавшейся от ложа поры частицы. Частица может сдвинуться параллельно продольной оси, оторваться от ложа и перейти во взвешенное состояние, повернуться вокруг точки контакта (рис. 1).

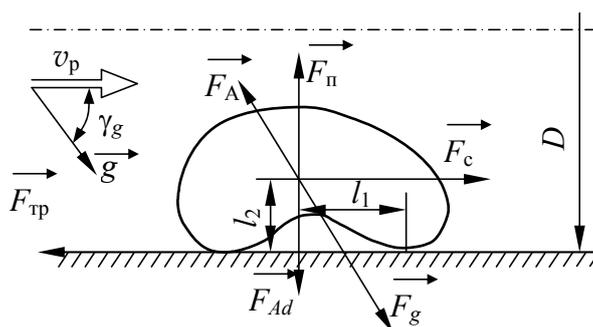


Рис. 1. Схема действия сил на смываемую частицу отложений в СОФ  
 Fig. 1. Chart of action of forces on the washed off particle of sedimentations in SCF

Условия предельного равновесия частицы в момент отрыва представляют собой равенства

$$\left. \begin{aligned} F_c + F_{gA} \cos \gamma_g - f_{\text{тр}} (F_{gA} \sin \gamma_g + F_{Ad} - F_{\text{п}}) &\geq 0; \\ F_{Ad} + F_{gA} \sin \gamma_g - F_{\text{п}} &\geq 0; \\ (F_{\text{п}} - F_{gA} \sin \gamma_g) l_1 + (F_c + F_{gA} \cos \gamma_g) l_2 &\geq 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F_g$  – сила тяжести;  $F_A$  – сила Архимеда;  $F_{Ad}$  – сила адгезии;  $F_{\text{п}}$  – подъемная сила;  $F_c$  – сила Стокса;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения частицы о ложе поры;  $v_p$  – скорость промывного потока;  $D$  – диаметр поры;  $l_1, l_2$  – координаты центра тяжести частицы;  $\gamma_g$  – угол между направлением промывного потока и земным притяжением.

Первое уравнение в системе (1) представляет проекцию всех действующих на частицу сил на ось капилляра. Второе – перпендикулярно потоку. Третье уравнение определяет условия удаления частицы из капилляра за счет перекачивания. При этом опрокидывающие частицу моменты приведены относительно точек опоры.

Расшифровка  $F_i$  приведена в работе [2]. Сила сопротивления  $F_c$  и подъемная  $F_n$  найдены из условия параболического распределения скоростей по сечению канала. Решение системы уравнений (1) позволяет определить среднюю скорость потока в капилляре, которая переводит рассматриваемую частицу за счет действия подъемной силы во взвешенное состояние, что соответствует условию ее удаления при промывке капилляра.

Скорость промывного потока, при которой возникает наибольшая вероятность удаления частицы с отрывом и без отрыва от гладкой ложи, т.е. переводом во взвешенное состояние или скольжением (качением), выражается через критерий Рейнольдса

$$\text{Re}_p \geq \frac{f_{\text{тр}}}{1 + \beta_n f_{\text{тр}}} \left[ \frac{\rho_{\text{эф}} g d^2 \sin \gamma_g}{18 \mu_m} + \frac{Q_r}{72 \delta_d^2 \left( 1 + \frac{2\pi \delta_d}{\lambda_m} \right) \mu_m d} \right] \frac{D^2 \rho_m}{2 \mu_m \left( 2 - \frac{d}{D} \right) d}, \quad (2)$$

где  $\text{Re}_p$  – критерий Рейнольдса для потока в капилляре, при котором частица из него удаляется;  $\beta_n$  – характеристика подъемной силы в долях  $F_c$ ;  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $\delta_d$  – толщина сольватной оболочки частицы;  $\lambda_m$  – физическая константа масла при расчете коэффициента адгезии [2];  $Q_r$  – постоянная Гаммакера;  $d$  – диаметр частиц загрязнений;  $D$  – диаметр поры фильтровального материала (ФМ);  $\rho_{\text{эф}}$  – эффективная плотность частицы;  $\rho_m$  – плотность масла;  $\mu_m$  – вязкость масла.

При воздействии промывного потока на частицу возникает подъемная сила  $F_n$ . Под действием этой силы частица взвешивается и удаляется. Эффективное гидродинамическое воздействие на частицу, приводящее к ее удалению, при оценке  $F_n$  определяли посредством критерия  $\text{Re}_p$  по формуле

$$\text{Re}_p \geq \frac{D^2 \rho_m}{4 \mu_m d^2} \left( \frac{\rho_{\text{эф}} g d^2 \sin \gamma_g + \frac{Q_r}{4\pi \delta_d^2 \left( 1 + \frac{2\pi \delta_d}{\lambda_m} \right)}}{\rho_m \left( 1 - \frac{d}{D} \right) \left( 2 - \frac{d}{D} \right)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

При фильтрации в капилляре скапливается множество частиц. Удаление их противотоком с вероятностью 95 % возможно, если длительность промывки составляет  $\tau_p \geq \left( \frac{\text{Re}_\phi}{\text{Re}_p} \right)^{3,31} c_\phi \tau_\phi$ .

Параметр  $\tau_p$  зависит от массы и степени уплотнения дисперсной фазы в поровом пространстве, определяемых через характеристики цикла фильтрации:  $\text{Re}_\phi$  – критерий Рейнольдса при фильтрации;  $\text{Re}_p$  – критерий Рейнольдса при регенерации;  $\tau_\phi$  – продолжительность фильтрации;  $\phi_\phi$  – коэффициент отсева загрязнений фильтром;  $c$  – концентрация нерастворимых примесей в суспензии (топливе, масле).

При искусственной турбулизации промывного потока вероятность отрыва частиц по (3) хорошо согласуется с выраженным через массообмен в поре коэффициентом регенерации.

Последний может определяться с помощью средней скорости радиальных турбулентных пульсаций промывного потока  $\bar{v}_r$  на входе в ФЭ через интеграл вероятности erfх [3].

$$\varphi_{pg} = \operatorname{erf} \left[ \frac{2\rho_m^2 St_{dp}^2 \bar{v}_r^2}{3(St_{dp}^2 + 1)\rho_{эф} Dg} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $St_{dp}$  – критерий Стокса [2] при обтекании промывным потоком частицы загрязнений, находящейся в русле поры ФМ;  $\bar{v}_r$  – скорость турбулентных пульсаций, создаваемых искусственно для интенсификации регенерации СОФ.

Проверку адекватности полученных на основе выражений (2)-(4) зависимостей для расчета «весового» коэффициента регенерации осуществляли на безмоторном стенде в лаборатории химмотологии МГУ им. адм. Г.И. Невельского. Коэффициент  $\varphi_{pg}$  определяли взвешиванием загрязненной фильтровальной сетки до и после действия на ее отложения стандартного (обратного) промывного потока.

Условия и методика испытаний описаны в работе [1]. В качестве загрязнителя использовалась кварцевая пыль с удельной поверхностью  $1,05 \text{ м}^2/\text{г}$ . Адгезионную составляющую частиц кварца к ложе пор усиливали, создавая на загрязнителе сольватную оболочку за счет использования отложений отработанного масла и специальных поверхностно-активных веществ [1].

В качестве ФМ использовались тканые сетки полотняного переплетения. Номинальная тонкость отсева их составляла 20–50 мкм. Испытываемые образцы представляли собой круги диаметром 30 мм. В качестве опоры фильтровального материала, чтобы исключить его продавливание, использовались сетки «грубого» плетения. Параметр промывки  $v_p$  превышал скорость фильтровального потока в 4–30 раз. Фильтрация и промывку осуществляли с использованием моторного масла вязкостью 30–40 сСт на рабочем режиме. С этой целью его подогревали до температуры 60–70 °С. В качестве фильтровальной среды использовали масло М-10, загрязненное кварцевой пылью концентрацией 0,2 %.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента регенерации СОФ от среднего размера  $m_d$  частиц загрязнений, отложившихся на ФС. Сходимость расчетов по модели (4) с экспериментальными данными хорошая. В области крупных частиц ( $m_d/\Delta_{0,95} > 0,4$ ) расчетные данные находятся в доверительных границах экспериментальных результатов, определенных с вероятностью 0,95. Упрощенный подход к расчету  $\varphi_{pg}$  по модели, приведенной в работе [1], дает худшую сходимость, особенно для мелкодисперсных загрязнений ( $m_d/\Delta_{0,95} < 0,4$ ). Для крупных частиц расхождения по предложенной зависимости и модели [1] незначительны. При этом расчетная зависимость  $\varphi_{pg}(m_d/\Delta_{0,95})$  по выражению (4) имеет меньшие отклонения от экспериментальных данных в сравнении с результатами, полученными по модели [1].

Интенсификация процесса промывки СОФ за счет увеличения скорости промывного потока показывает, что высокие значения коэффициента регенерации  $\varphi_{pg} = 0,85\text{--}0,98$  возможны при скоростях промывного потока, превышающие фильтровальный в 7–10 раз (рис. 3). Увеличение  $v_p$  до 0,1 м/с при вязкостях  $v_m = 30$  сСт обеспечивает эффективное функционирование СОФ со значением  $\varphi_{pg} > 0,95$ .

По точности идентификации процесса регенерации фильтров типа СОФ и ФМ [1, 2] наилучшую сопоставимость с экспериментальными данными дает модель (4). Во всех случаях при  $Re_p/Re_\phi > 9$  расчетные зависимости по  $\varphi_{pg}$  (рис. 3) ниже экспериментальных, а при

низких  $Re_p$  расхождение расчетных и экспериментальных результатов в среднем составляет 20 %. При этом экспериментальные значения  $\varphi_{pg}$  ниже расчетных. Такое явление объясняется пренебрежением учета взаимодействия частиц в ансамбле (группе) загрязнений при их удалении. Рассматриваемый процесс идентифицирован через удаление одиночных, не взаимодействующих друг с другом частиц дисперсной фазы.

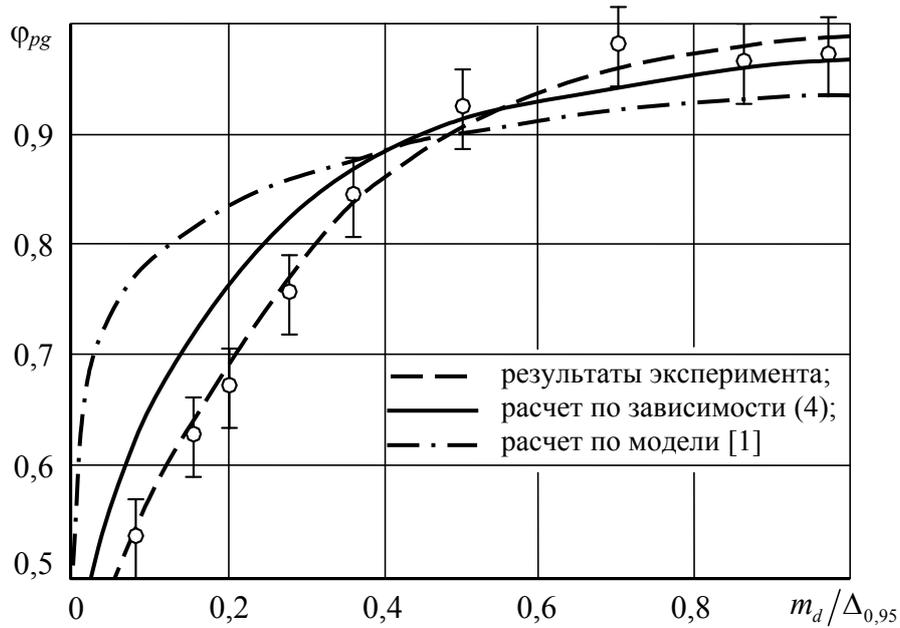


Рис. 2. Влияние размера частиц отложений на коэффициент регенерации СОФ  
Fig. 2. Influence of the size of particles of deposits on coefficient of regeneration of SCF

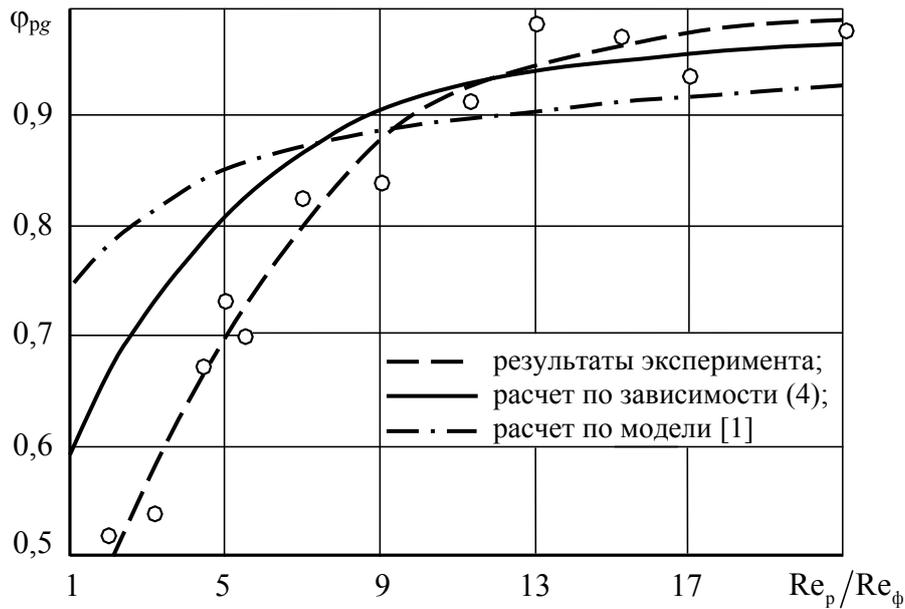


Рис. 3. Расчетные зависимости по  $\varphi_{pg}$  при разной интенсивности промывного потока  
Fig. 3. Calculation dependences for  $\varphi_{pg}$  at different intensity of flow of lavage

Роль адгезионного удержания частиц ложей капилляра видно из рис. 4. Влияние адгезионной группы захвата  $N_{Адп}$ , идентифицируемой по методике [2], проявляется при  $N_{Адп} > 10^{-2}$ . Расчетные данные по  $\varphi_{pg}$  при оценке влияния адгезионного захвата хорошо согласуются с экспериментальными значениями этого коэффициента практически во всем диапазоне адгезионных свойств рабочей фазы загрязнений топлива и масла. Для искусственного загрязнителя расхождение теоретических зависимостей  $\varphi_{pg}(N_{Адп})$  от полученных экспериментально не превышает при использовании зависимости (4) 12 %.

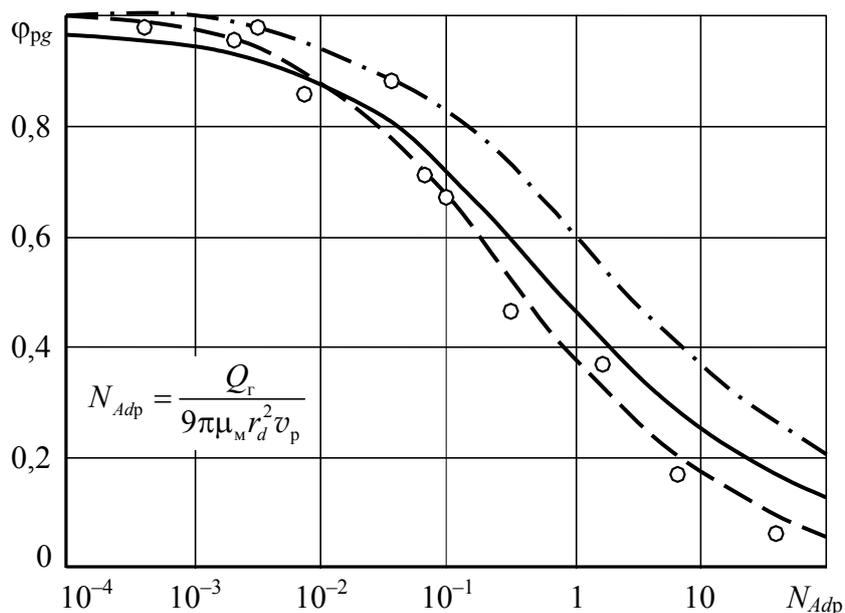


Рис. 4. Роль адгезионного удержания частиц ложей капилляра  
 Fig. 4. Role of the adhesion withholding of particles of beds of capillary

Моделирование процесса противоточной регенерации СОФ на одиночных не взаимодействующих частицах загрязнений ФЭ показала допустимость использования разработанной методики для оценки эффективности данного процесса при отфильтровывании крупнодисперсного загрязнителя. При идентификации процесса регенерации СОФ, когда осуществляется фильтрация суспензии с мелкодисперсной фазой загрязнений, необходим иной подход, когда рассматривается удаление не одиночных, а взаимодействующих частиц дисперсной фазы, отложившихся в капиллярах и перешедших во взвешенное состояние под воздействием промывного потока.

Предложенная методика расчета процесса регенерации современных СОФ приемлема для судовых очистителей технических жидкостей, предназначенных для удаления крупнодисперсных загрязнителей, например, полнопоточного фильтрования моторных масел форсированных дизелей, для которых номинальная тонкость отсева  $\Delta_{0,95}$  составляет 30–50 мкм. В системах смазки таких ДВС крупнодисперсных загрязнителей незначительно, поэтому процесс регенерации моделируется по предлагаемой методике с высокой точностью.

**Выводы**

1. Уточнены некоторые теоретические положения расчета эффективности регенерации самоочищающихся фильтров. Гидродинамическое воздействие на частицы загрязнений, вы-

зывающее разблокирование пор, взвешивание и унос дисперсной фазы из капилляра, определено по балансу массовых, гидродинамических и адгезионных сил с учетом вероятностной природы осаждения и размещения частицы в ложе, а также искусственных пульсаций промывного потока для повышения эффективности рассматриваемого процесса.

2. Получена модель процесса регенерации, позволяющая вести расчет его эффективности и периодичности химической мойки самоочищающихся фильтров в зависимости от гидродинамической интенсивности и продолжительности промывки обратным потоком, от особенностей конструкции фильтрующего элемента, блокировки пор отложениями, их адгезионной активности и уплотнения, размера пор и частиц дисперсной фазы, специфики структуры, регенерируемости фильтрующего материала и процесса фильтрования. Выявлено, что наибольшее влияние на  $\varphi_p$  оказывают  $Re_p$  промывного потока.

### Список литературы

1. Создание самоочищающихся фильтров повышенной эффективности и автономности для систем смазки дизелей: отчет о НИР / Дальневост. высш. инж. мор, уч-ще; Руководитель Г.П. Кича. – ХДТ-2/84ДС; № ГР 01840016833; Инв. № 02900033091. – Владивосток, 1989. – 116 с.
2. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. – 372 с.
3. Бойко С.П. Моделирование эффективности противотечной регенерации судовых самоочищающихся фильтров топлива и масла // Молодежь – Наука – Инновации: материалы 61-й Междунар. науч.-практ. конф. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. – Т. 1. – С. 38–41.

**Сведения об авторе:** Бойко Сергей Петрович, аспирант; e-mail: nadezkin@msun.ru.

УДК 621.1

**В.В. Кирюха**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

**ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ  
ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ КОРРОЗИИ**

*Рассмотрены теоретические и практические вопросы применения индуктивных преобразователей для оперативного контроля толщины слоя коррозии, предложены практические схемы построения приборов контроля.*

**Ключевые слова:** индуктивный преобразователь, точность контроля, коррозия, датчик.

**V.V. Kiryuha****INDUCTIVE SENSORS AND THEIR APPLICATION TO SOLVING  
OPERATIONAL CONTROL CORROSION LAYER THICKNESS**

*Theoretical and practical issues of application of inductive transducers to control the thickness of the layer of corrosion.*

**Key words:** converter, precision, control, corrosion, wear.

Индуктивные преобразователи представляют собой катушку индуктивности, параметры которой изменяются при механическом перемещении элементов магнитопровода относительно друг друга. Полное сопротивление любой катушки индуктивности – дросселя – складывается из активного и индуктивного сопротивлений и может быть определено по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2},$$

где  $R$  – активное сопротивление;  $f$  – частота;  $L$  – индуктивность.

Индуктивные датчики относятся к классу параметрических. Если датчик имеет незамкнутый магнитопровод, то любое перемещение элементов магнитопровода вызывает изменение параметров магнитной и электрической цепей, что, в свою очередь, вызывает изменение выходной величины – электрического тока или напряжения.

На рис. 1 показан индуктивный преобразователь с изменяющейся индуктивностью, а на рис. 2 – индуктивный датчик с нагрузкой  $L$ , подключенный к питающему напряжению  $V$ .

Индуктивность катушки с обмоткой определяется по формуле

$$L = \frac{w\Phi}{I},$$

где  $w$  – число витков катушки;  $\Phi$  – магнитный поток, пронизывающий катушку;  $I$  – ток, проходящий по катушке.

В свою очередь, ток, проходящий по катушке, можно выразить как

$$I = \frac{HI}{w},$$

где  $HI$  – МДС катушки.

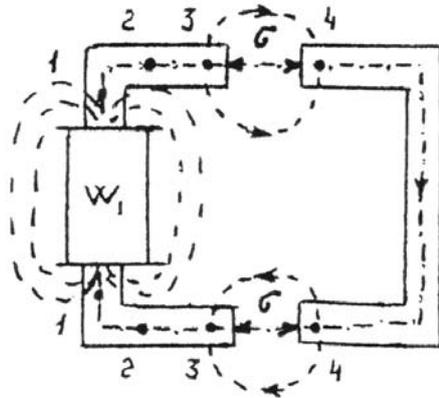


Рис. 1. Индуктивный преобразователь  
Fig. 1. Inductive transducer

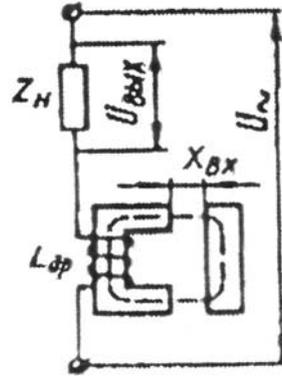


Рис. 2. Подключение индуктивного датчика  
Fig. 2. Connection of the inductive sensor

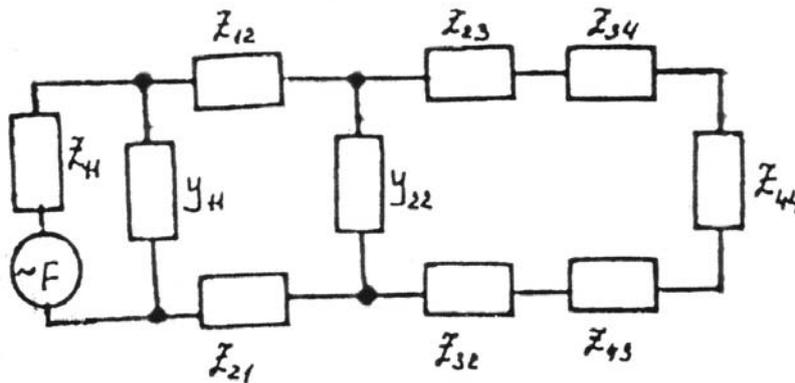


Рис. 3. Схема замещения  
Fig. 3. Equivalent network

Тогда

$$L = w \frac{2}{R_m},$$

где  $R_m$  – магнитное сопротивление преобразователя.

Полное магнитное сопротивление преобразователя складывается из магнитного сопротивления ферромагнитного участка и магнитного сопротивления зазоров.

Магнитное сопротивление ферромагнитного участка может быть определено как

$$R_\delta = \frac{l_\delta}{\mu_\delta \cdot \mu_i \cdot S_\delta},$$

где  $l_\delta$  – длина средней силовой линии, проходящей по ферромагнитным участкам;  $\mu_\delta$  – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала сердечника;  $\mu_i = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{А}{i}$  – магнитная постоянная;  $S_\delta$  – поперечное сечение ферромагнитных участков.

Магнитное сопротивление воздушных зазоров может быть определено как

$$R_{\zeta} = \frac{2\delta}{\mu_i S_{\zeta}},$$

где  $\delta$  – толщина воздушного зазора;  $S_{\zeta}$  – поперечное сечение воздушного зазора.

При  $S_{\delta} = S_{\zeta} = S$  и с учетом того, что магнитное сопротивление ферромагнитного участка много меньше магнитного сопротивления воздушного зазора, индуктивность преобразователя может быть определена по формуле

$$L = \frac{\mu_i S \cdot w^2}{2\delta}.$$

Тогда для схемы, показанной на рис. 2 среднее значение тока в рабочей цепи преобразователя может быть определено по формуле

$$I = V / \sqrt{R^2 + X_L^2} = V / \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}.$$

Учитывая, что на практике для индуктивных преобразователей выполняется условие  $R \ll X_L$ , получаем:

$$V_{\dot{a}i\delta} = \frac{VR_i}{\sqrt{R^2 + (\omega\mu_o S \cdot w^2 / \delta)^2}} = \frac{VR_i \delta}{\omega\mu_o Sw^2} = K\delta,$$

где  $K = VR_i / (\omega\mu_o Sw^2)$  – коэффициент преобразования.

Коэффициент преобразования – величина постоянная, поэтому статическая характеристика  $V_{\dot{a}i\delta} = f(\delta)$  должна представлять собой прямую, проходящую через начало координат под углом  $\alpha = ar\ ctg\ K$  к оси абсцисс. Реальные характеристики отличаются от идеальной. Это объясняется тем, что при малых значениях  $\delta$  допущение, что  $r_m \ll r_{\delta}$  становится неверным, так как магнитное сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи становится неизмеримым с магнитным сопротивлением воздушного зазора, а при больших значениях зазора падает индуктивность обмотки  $L$  и реактивное сопротивление  $X_L$  становится соизмеримым с активным сопротивлением магнитной цепи, т.е.  $R \cong X_L$ . Эти несоблюдения принятых в начале рассмотрения допущений и приводят к искажению статической характеристики.

Однако приведенные расхождения показывают, что имеется однозначная, близкая к линейной, зависимость выходных параметров индуктивного преобразователя от величины зазора в магнитопроводе.

Если индуктивный преобразователь изготовить без собственного якоря, а в качестве якоря использовать внешнюю ферромагнитную поверхность, то выходные параметры такого преобразователя будут изменяться в зависимости от расстояния (зазора) между измерительным преобразователем и внешней ферромагнитной поверхностью. Причем зазор может быть заполнен любым веществом с магнитной проницаемостью, отличной от магнитной проницаемости ферромагнитного вещества магнитопровода.

Магнитная проницаемость окислов железа (ржавчины) отличается от магнитной проницаемости железа. Поэтому датчики индуктивного типа можно использовать для контроля толщины слоя коррозии. Часто слой коррозии возникает под лакокрасочными покрытиями или имеются отдельные участки, покрытые ржавчиной и с нанесенными слоями краски. В таком случае датчик будет определять расстояние между непосредственно датчиком и ферромагнитным материалом.

Все ферромагнитные материалы в той или иной степени подвержены коррозии. Особенно сильно подвергаются коррозии металлические конструкции, работающие на открытом воздухе или в условиях агрессивней среды (опоры линий электропередач, корпус судна и т.д.). Коррозивные повреждения могут носить неравномерный характер. Это связано с тем, что на отдельных частях поверхности конструкций может быть нарушен защитный слой краски или отдельные части больше подвержены воздействию влаги. Контроль толщины слоя коррозии определяется эксплуатационными требованиями к таким сооружениям. Наиболее часто требуется контроль на достаточно громоздких и объемных сооружениях. Это опоры линий электропередач, металлические поверхности воздухо- и дымоотводных труб, листовые металлические поверхности крыш складов и пакгаузов, поверхности судовых конструкций. Зачастую часть таких конструкций находится в труднодоступных местах, что затрудняет проведение контрольных измерений. Для контроля толщины слоя коррозии в этих случаях необходимы приборы, удобные для обслуживания и позволяющие проводить замеры в условиях повышенного риска (большая высота, подводные замеры и т.д.) с достаточно высокой степенью точности. Необходимая точность таких измерений составляет 0,5-1,0 мм. Это объясняется тем, что толщина слоя коррозии может варьировать на вышеназванных сооружениях от долей до десятков миллиметров и допустимая погрешность оперативного контроля для оценки эксплуатационной надежности составляет 10-15 %.

Теоретически расчет электромагнитного преобразователя заключается в определении его электрических и магнитных параметров. Для преобразователя, показанного на рис. 1, может быть применена схема замещения, показанная на рис. 3. Преобразователь состоит из магнитопровода с зазором, в котором находится вещество с магнитными свойствами, отличными от свойств основного магнитопровода и катушки, расположенной на этом магнитопроводе. Полное сопротивление обмотки при питании ее переменным током можно записать в виде

$$L = R_0 + j\omega \frac{w^2}{L_m + R_\Delta} = R_0 + j\omega \cdot \frac{w^2 (R_m + R_\Delta)}{(R_m + R_\Delta)^2 + X_m^2} + \frac{w_\omega^2 X_m}{(R_m + R_\Delta)^2 + X_m^2} = R_{y\acute{e}a} + j\omega L$$

$$L_m = R_m + jX_m,$$

где  $w$  – число витков обмотки;  $R_0$  – сопротивление обмотки постоянному току;  $L_m$  – магнитное сопротивление магнитопровода;  $R_\Delta = \frac{2\delta}{\mu_i S}$  – магнитное сопротивление зазора;  $\delta$ ,  $S$  – толщина и площадь зазора.

Расчет магнитной цепи преобразователя с учетом сопротивления утечек производится на основе эквивалентной схемы замещения магнитной цепи. Для упрощения расчетов можно считать сосредоточенными параметрами комплексные магнитные сопротивления отдельных участков магнитопровода ( $L_1 - L_4$ ), магнитные сопротивления воздушных зазоров  $R_\Delta$  и проводимости путей утечек ( $J_{11}$ ,  $J_{22}$ ).

Расчет магнитных сопротивлений основных участков магнитопровода должен основываться на учете изменения значения индукции в материале и от степени проявления поверхностного эффекта. Поверхностный эффект необходимо учитывать при применении магнитопровода из сплошного материала и достаточно высокой частоте питающего напряжения. В расчетах поверхностный эффект учитывается при толщине листа или сплошного магнитопровода более чем  $2L_{0,05}$ , где  $L_{0,05}$  – глубина проникновения электромагнитной волны в материал. Глубина проникновения для стали на частоте 50 Гц составляет 1-2 мм.

В условиях переменного магнитного поля при отсутствии или слабом проявлении поверхностного эффекта активная  $R_m$  и реактивная  $X_m$  составляющие магнитного сопротивления каждого участка рассчитываются по формулам

$$R_m = l / \mu S, \quad X_m = P_{\text{нб}} / \omega \hat{O}^2,$$

где  $\Phi$  – действующий магнитный поток;  $P_{\text{нб}}$  – мощность потерь на гистерезис и вихревые токи.

Значение мощности потерь для различных материалов магнитопровода учитывалось по ГОСТ 21427.0-75 и ГОСТ 21427.3-75. При сильном поверхностном эффекте магнитные сопротивления определяются не площадями  $S$ , а периметрами сечений ферромагнитных участков исследуемого магнитопровода  $V$ :

$$R_m = pl / V, \quad X_m = \chi l / V,$$

где  $p, \chi$  – удельные поверхностные сопротивления, зависящие от свойств материала, частоты и линейной плотности магнитного потока.

На рис. 4 приведены характеристики  $p$  и  $\chi$  для мягкой стали. Характеристики даны для частоты 50 Гц, однако их можно пересчитать на другую частоту по формулам

$$P_f = P_{50} \sqrt{f/50}, \quad \chi_f = \chi_{50} \sqrt{f/50}, \quad (\hat{O}/V)_f = (\hat{O}/V)_{50} \cdot \sqrt{50/f},$$

где  $P_{50} : \chi_{50} : (\hat{O}/V)_{50}$  – параметр на частоте 50 Гц;  $P_f : \chi_f : (\hat{O}/V)_f$  – параметр на искомой частоте.

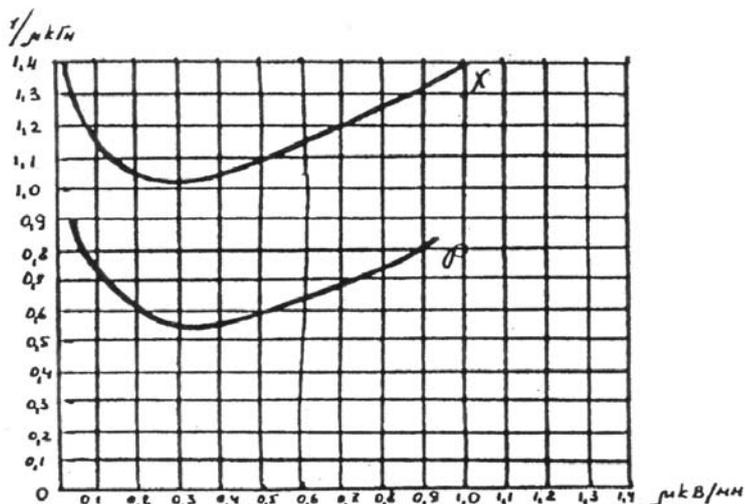


Рис. 4. Характеристики  $p$  и  $\chi$   
 Fig. 4. Characteristic  $p$  and  $\chi$

При расчете магнитных сопротивлений зазоров и путей утечек через воздух необходимо учитывать, что невозможно добиться абсолютного прилегания датчика к контролируемой поверхности, поэтому будут иметься воздушные зазоры, которые будут влиять на распределение магнитной индукции в зазоре и на величину утечек с боковых поверхностей и ребер полюсов. При этом значение магнитного потока, идущего мимо рабочего зазора, будет тем больше, чем больше отношение толщины зазора к площади рабочей поверхности датчика. Поэтому равномерность индукции в зазоре достигается при использовании датчиков с сердечниками, геометрические размеры, плоскости контакта которых значительно превышают величину зазоров.

Электрическое сопротивление преобразователя с некоторыми допущениями, что все сопротивления утечек включены параллельно зазору, может быть выражено формулой

$$L = R_0 + j \frac{\omega w^2}{R_m + jX_m + P_\Delta \parallel R_{\delta\delta}} = R_0 + j \frac{\omega w^2}{R_m jX_m + \frac{\sigma}{\mu S} \parallel R_{\delta\delta}} =$$

$$= \frac{\omega w^2 X_m}{R_0 + \sqrt{(R_m + R_\Delta \parallel R_{\delta\delta})^2 + X_m^2}} + j \frac{\omega w^2 \left( R_m + \frac{\sigma}{\mu S} \parallel R_{\delta\delta} \right)}{\sqrt{(R_m + R_\Delta \parallel R_{\delta\delta})^2 + X_m^2}}.$$

Из этой формулы видно, что  $L$  связано с параметром зазора  $\delta$  зависимостью, близкой к гиперболической. Данная зависимость показана на рис. 5.

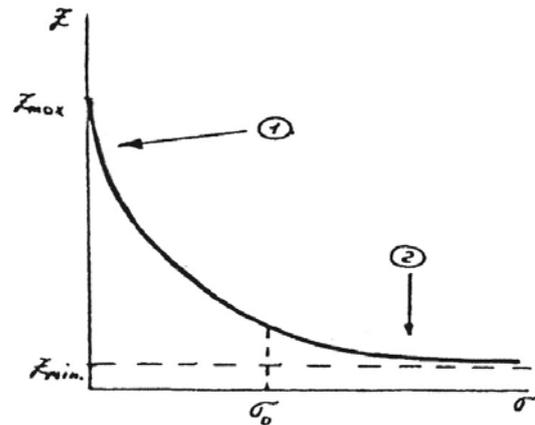


Рис. 5. Зависимость  $Z = f(\sigma)$

Fig. 5. Relation  $Z = f(\sigma)$

Для успешной работы датчика желательно иметь участок линейной зависимости. Он может быть выбран либо в верхней, либо в нижней части зависимости. Использование в качестве рабочего участка верхней части зависимости (участок 1) дает высокую чувствительность измерителя. Этот участок можно использовать для контроля толщин в пределах 0,001-0,1 мм. При необходимости контроля толщин 1,0-10,0 мм целесообразно использовать нижний участок зависимости (участок 2).

Автором разработан и успешно применяется прибор для оперативного контроля толщины слоя коррозии с датчиком индуктивного типа, построенного на основе вышеизложенных соображений. Применен датчик на основе броневое сердечника с катушкой, содержащей около 4000 витков. При работе на верхнем участке характеристики имеется изменение со-

противления 5-10 Ом на 1 мкм, при работе на нижнем участке характеристики – 0,1-0,3 Ом на 1 мкм. Такое изменение легко фиксируется приборами. Для увеличения точности контроля применена мостовая схема измерения. В одно плечо измерительного моста включен датчик, а в другое – компенсатор, который представляет собой копию датчика с нулевым или фиксированным зазором. Блок-схема прибора для оперативного контроля толщины слоя коррозии показана на рис. 6.

Применение приборов такого типа позволяет оперативно и с приемлемой точностью проводить контроль больших поверхностей, в том числе в труднодоступных местах.

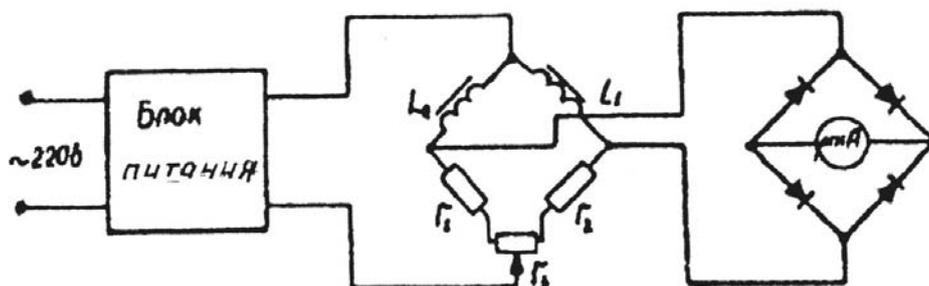


Рис. 6. Блок-схема прибора  
Fig. 6. Block diagram of the device

### Список литературы

1. Кирюха В.В. Измерительные преобразователи в системах автоматики. Теория, устройство, применение. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2007. – 216 с.
2. Кирюха В.В., Соломанюк Л.С. Задача оперативного контроля толщины слоя коррозии и способы ее технического решения // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток, 2001. – Вып. 14.

**Сведения об авторе:** Кирюха Владимир Витальевич, доцент.

УДК 519.634

**Ю.А. Корнейчук**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ**

*Затрагиваются вопросы технического обеспечения научных исследований и обучения в университетах. Огромные возможности компьютерных технологий недостаточно освоены. Представлен опыт использования компьютеров в лабораторных работах и научных исследованиях. Основное внимание уделяется визуализации физических полей.*

**Ключевые слова:** персональный компьютер, визуализация, сигнал, физическое поле.

**Y.A. Korneychuk**

## **VISUALIZATION OF SIGNALS OF PHYSICAL FIELDS ON THE PERSONAL COMPUTER**

*The article mentions questions of technical maintenance of university scientific researches and training. Huge opportunities of computer technologies are poorly used. The results of computer experience in laboratory works and scientific researches are presented. The basic attention is given to visualization of physical fields.*

**Key words:** personal computer, visualization, signal, physical field.

Широко известны достижения компьютерных технологий при измерении и отображении тепловых полей с применением инфракрасных преобразователей в пирометрах и тепловизорах [1]. Визуализация ультразвуковых исследований (УЗИ) повсеместно используется в медицине. Использование промышленных компьютеров для измерения и отображения сигналов физических полей описано в источниках [2, 3].

Известно направление использования компьютерной техники путем разработки и внедрения автоматизированных обучающих систем СЭУ [4] и для тестирования компетенций судовых механиков [5].

Наряду с этим компьютерная техника в учебных заведениях используется недостаточно эффективно.

Поскольку в своей профессиональной деятельности судовым специалистам приходится пользоваться рядом измерительных приборов, представляется целесообразным еще одно направление повышения эффективности использования компьютерной техники в морских учебных заведениях путем придания ей функций измерительных приборов – мультиметров, осциллографов, виброанализаторов. Предполагается повысить качество обучения студентов и аспирантов путем использования программного обеспечения имитации работы измерительных приборов. Экономический эффект ожидается получить за счет снижения затрат на приобретение дорогостоящих приборов. Поставлена задача использовать вместо реального осциллографа персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением.

**Виртуальный осциллограф.** Для испытания выбрана наиболее простая и доступная программа «Digital Oscilloscope», имитирующая работу низкочастотного осциллографа. При запуске программы на экране появляется изображение осциллографа (рис. 1), с которым сразу можно начать экспериментировать. Работа осциллографа описана в тексте программы.

Рукояткой 1 (рис. 1) устанавливаем время в миллисекундах в одном горизонтальном делении сетки (1...100 мс). Калибровка времени и частоты измерения не требуется. Рукоятка 2 служит для калибровки осциллографа по вертикали по известному сигналу напряжения. Рукояткой 3 осуществляем старт записи с одной позиции. Рукояткой 4 регулируем величину напряжения (вольт) одного вертикального отсчета сетки. Рукоятка 5 служит для калибровки нулевого напряжения смещением сетки по вертикали. Рукояткой 6 выбирают временной интервал сигнала. Рукояткой 7 изменяют время наблюдения входного сигнала. Рукоятками 8 и 9 выбирают яркость и толщину линии графика сигнала. Рукоятки 10 и 11 служат для вертикального и горизонтального смещения сигнала. Кнопкой 12 дают команду на сохранение результатов.

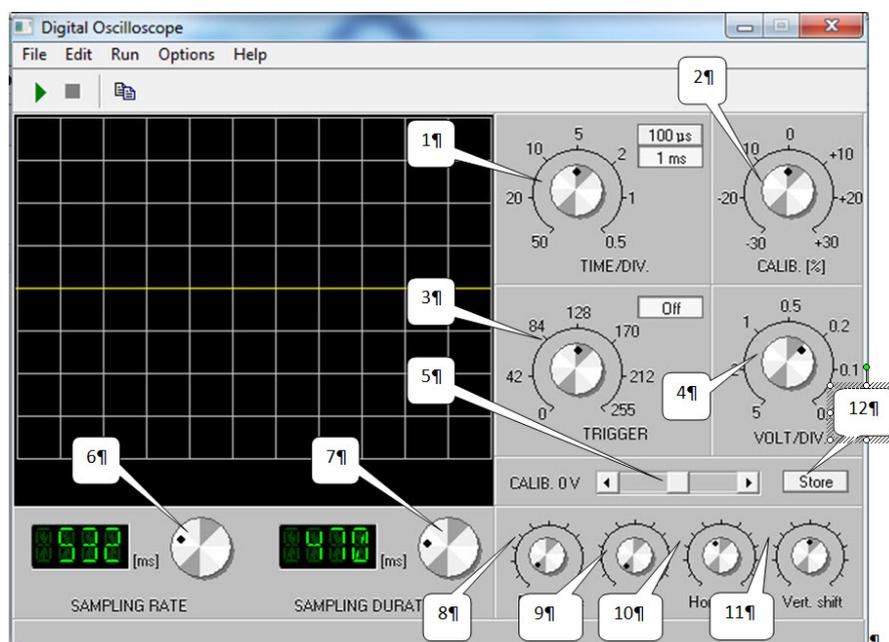


Рис. 1. Органы управления осциллографа: 1 – регулятор временного интервала сетки; 2 – калибровка сигнала по вертикали; 3 – триггер; 4 – регулировка цены деления сигнала по амплитуде напряжения; 5 – калибровка нулевого значения напряжения; 6 – диапазон выборки; 7 – длительность выборки; 8 – яркость; 9 – фокус; 10 – горизонтальное смещение; 11 – вертикальное смещение; 12 – сохранить

Fig. 1. Oscilloscope controls: 1 – Time/Division; 2 – Calibration [%]; 3 – Trigger; 4 – Volt/Division; 5 – Calibration 0 V; 6 – Sampling rate; 7 – Sampling Duration; 8 – Brightness; 9 – Focus; 10 – Horizontal Shift; 11 – Vertical shift; 12 – Store

Рассмотрим вопрос подключения проверяемых устройств, например, датчиков физических полей, к виртуальному осциллографу. На звуковой карте каждого компьютера есть выход на наушники и вход для подключения внешнего микрофона. Обычно они обозначаются символами: «выход» – наушники (Speaker), «вход» – микрофон (Mic). Встречается дополнительная опция – «линейный» выход для подключения звуковой карты к внешнему усилителю, он обозначается надписью «Line Out», а также вход для подключения сигнала с внешнего устройства, обозначаемый «Line In». Эти выходы-входы рассчитаны для подключения стандартного 3,5 мм стереоразъема (как в обыкновенных стереонаушниках). Подключать исследуемые сигналы можно на разъемы «Mic» и «Line In», а сигнал генератора можно получать на разъемах «Speaker» и «Line Out». При этом следует учитывать электрические харак-

теристики этих разъемов, чтобы не повредить звуковую карту. Входной разъем «Mic» допускает входящее звуковое напряжение в пределах 500 мВ (0,5 В), а входной разъем «Line In» допускает входящее звуковое напряжение в пределах до 2 В.

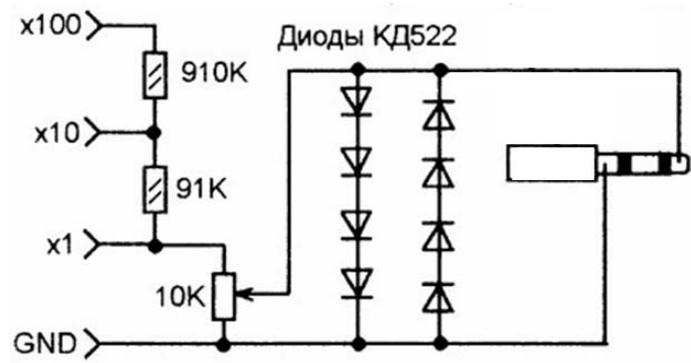
Здесь даны средние электрические характеристики разъемов, а конкретные зависят от вашей звуковой карты. Уровень входящего сигнала вы можете регулировать на панели операционной системы или на панели звуковой карты.

Если вы уверены, что не допустите превышения максимальных значений входного сигнала, то подсоединить устройство можно напрямую.

Звуковая карта компьютера выдерживает подачу на нее сигнала с уровнем до 3 В. На всякий случай, перед подключением устройства, ставьте регуляторы входного сигнала на минимум, а затем уже повышайте уровень до разумных пределов.

Опасаясь вывода из строя звуковой карты, можно подключить источник исследуемого сигнала по схеме (рис. 2). Схема подключения позволяет исследовать сигналы с амплитудой до 100 В. Включение делителя напряжения позволит уменьшить уровень входного сигнала в сотню раз.

Рис. 2. Схема снижения  
уровня сигнала  
Fig. 2. The signal level  
decrease scheme



Рассмотрим работу программы применительно к лабораторным работам. Стенд (рис. 3), предназначенный для сборки различных логических схем, поставляется без осциллографа. Применение виртуального осциллографа позволило использовать стенд по назначению.

Микросхемы стенда обладают положительной логикой, когда за логическую «1» принимаем напряжение 5 В, а за «0» – 0 В. В качестве примера на рис. 3 показан пилообразный сигнал, формируемый RS-триггером в составе стенда.

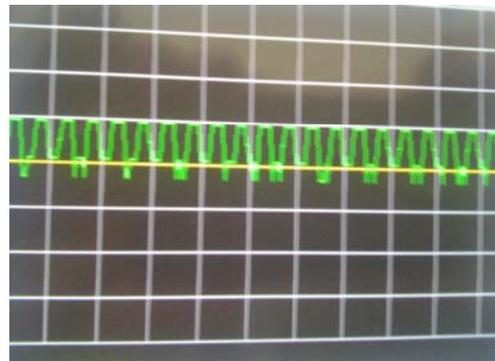
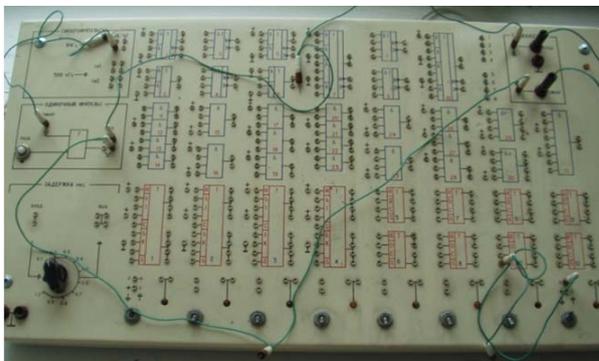


Рис. 3. Стенд логических функций. Пилообразный сигнал на выходе стенда  
Fig. 3. Panel of logic functions. Sawtooth signal on an output of the panel

Виброакустические измерения широко используются в технической диагностике. Качество диагноза в значительной степени зависит от специалиста, проводящего измерения. Он должен понимать сущность наблюдаемых процессов, что не всегда удается из-за отсутствия записи виброграммы. Например, переносной прибор АЛ-2-1 позволяет определить состояние подшипниковых узлов путем измерения парциального коэффициента амплитудной модуляции сигнала вибрации. Прибор предназначен для функциональной оценки технического состояния подшипниковых узлов машин и механизмов с частотой вращения ротора  $500-4000 \text{ мин}^{-1}$ . Шкала прибора разбита на три цветовых сектора, соответствующих трем категориям состояния подшипниковых узлов механизмов – малоизношенные, среднеизношенные и сильно изношенные. Прибор содержит измерительный блок АЛ-2-1 и щуп с пьезовибропреобразователем АДП12-01, рис. 4.



Рис. 4. Переносной прибор АЛ-2-1 для измерения коэффициента модуляции вибрации

Fig. 4. Portable device AL-2-1 for measurement of a vibration modulation factor

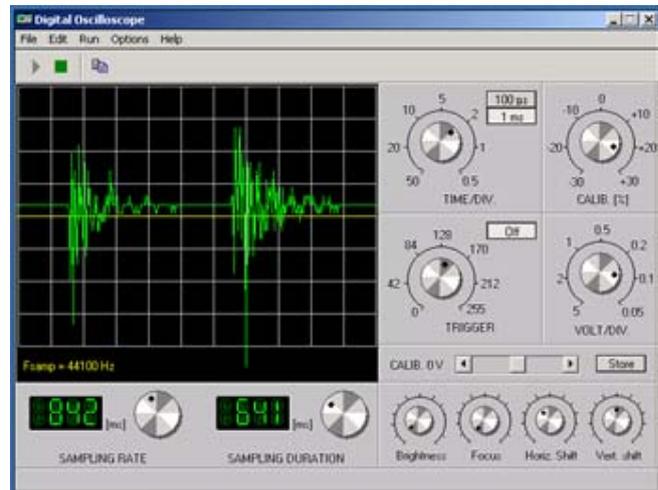
Датчик прижимают легким усилием к подшипниковому узлу. Сигнал вибрации с датчика поступает на вход прибора. По величине коэффициента амплитудной модуляции судят о состоянии подшипников.

Для расширения функциональных возможностей прибора проведено исследование сигнала пьезометрического датчика вибраций на виртуальном осциллографе. Сигнал с датчика на входе прибора мал по величине и не требует дополнительного ограничения. Поэтому датчик вибрации напрямую подключается стандартным разъемом к гнезду «Line-In» звуковой карты компьютера.

Рассмотрим последовательность операций при работе с программой «Digital Oscilloscope» применительно к измерению вибрации пьезометрическим акселерометром. Подключим пьезометрический датчик напрямую к гнезду «Line-In» звуковой карты компьютера. Включим компьютер. Активизируем программу виртуального осциллографа «Digital Oscilloscope». В роли источника вибрации используем электромагнит ударного действия, например, триммер с частотой электрического тока 50 Гц. Обеспечим надежное прилегание виброщупа пьезометрического датчика к источнику вибрации. На экране появится сигнал (рис. 5), который можно измерить.

Кнопкой 1 (см. рис. 2) можно растягивать полученный сигнал по оси времени – горизонтальная развертка, чтобы увидеть все особенности импульса и определить его период как расстояние между импульсами в миллисекундах. Например, рукоятка 1 остановилась на указателе 2 мс/дел. Расстояние между импульсами составило 5 клеток. Тогда период колебаний  $T = 2 \text{ мс/дел} \times 5 \text{ делений} = 10 \text{ мс} = 0,01 \text{ с}$ . Частоту колебаний определим через период по известной формуле  $F = 1/T = 1/0,01 = 100 \text{ Гц}$ .

Рис. 5. Запись вибрации  
электробритвы (триммера)  
Fig. 5. Vibration record  
of electric-powered shaver



Почему при частоте тока 50 Гц мы получили при анализе виброграммы частоту вдвое больше? Ответ найдете в конструкции электромагнита триммера.

В заключение отметим, что персональные компьютеры можно использовать в качестве лабораторных приборов при исследовании электрических сигналов. Показаны примеры изучения процессов в области электроники, информатики и вибродиагностики. Наглядность изучаемых процессов способствует качественному обучению студентов и аспирантов. Важно отметить экономическую составляющую такого подхода. Компьютерная техника не должна простаивать и использоваться только в качестве пишущей либо счетной машинки.

### Список литературы

1. Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Четкин В.М. Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в задачах вычислительной физики // Журн. вычислительной математики и математической физики. – 2011. – Т. 51, № 4. – С. 669-683.
2. Данилов О.Е. Компьютерная визуализация распределений физических величин в пространстве // Молодой ученый. – 2013. – № 11. – С. 582-587.
3. Данилов О.Е. Концепция метода компьютерной визуализации полей физических величин // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2013. – № 4. – С. 88-7.
4. Соболенко А.Н., Гольцов В.В., Зима А.А. Система моделирования СЭУ // Пути повышения качества подготовки специалистов в современных условиях. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 1994. – С. 143-152.
5. Соболенко А.Н., Гольцов В.В. Аттестация судовых механиков: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 970530 от 21.10.97. – Заявка № 970441. – 8 с.

**Сведения об авторе:** Корнейчук Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: korneych@mail.ru.

УДК 532.5

**В.А. Плоткина**Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ТЕОРИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА РУБЕЖЕ XIX-XX ВЕКОВ**

*Представлен анализ развития теории гидродинамического и теплового пограничных слоев на стыке двух столетий. Основываясь на теоретических и экспериментальных исследованиях, приводится хронология исторических событий теории развития пограничного слоя. Рассматриваются аналитические предпосылки в исследовании пограничного слоя, сформулированные на основе теоретических и экспериментальных исследований известных ученых-экспериментаторов в области гидродинамики. Включены основные термины и определения, раскрывающие необходимость исследования теории развития пограничного слоя. Показана перспектива развития и целесообразность изучения исторического аспекта теории пограничного слоя.*

**Ключевые слова:** гидродинамический и тепловой пограничный слой, идеальная жидкость, сопротивление трению, отсос пограничного слоя, ламинарное и турбулентное течения.

**V.A. Plotkina****THEORY OF BOUNDARY LAYER ON THE TURN XIX – XX CENTURIES**

*The analysis of development of the theory is presented in this article hydrodynamic and thermal boundary layers on a joint of two centuries. Based on theoretical and experimental studies, a chronology of historical events of the theory of the boundary layer development. The analytical background in the study of the boundary layer, formulated on the basis of theoretical and experimental studies of known experimental scientists in the field of hydrodynamics. This article includes the basic terms and definitions reveal the necessity to study the development of the theory of the boundary layer. This publication shows the development prospects and feasibility of studying the historical aspect of the theory of the boundary layer.*

**Key words:** hydrodynamic and thermal boundary layer, ideal fluid, abrasion resistance, boundary layer suction, laminar and turbulent flow.

**Введение**

Современное разнообразие методов и способов управления пограничным слоем не дает четкого представления об истории развития теории исследования пограничного слоя вблизи поверхности тела. При этом в мировой практике стремятся совершенствовать навыки в разработке новых способов управления пограничным слоем.

Поэтому при всем разнообразии методов управления пограничным слоем вблизи поверхности корабельных судов общепризнанной характеристики исследования теории пограничного слоя в настоящее время еще не сложилось. Вследствие этого настоящая научная работа обобщает исторический процесс развития теории пограничного слоя на протяжении нескольких столетий.

При всем многообразии способов управления пограничным слоем исторический аспект не может быть проигнорирован. Именно научный анализ теории развития пограничного слоя способствует совершенствованию навыков в развитии новых способов и методов управления пограничным слоем.

**Объекты и методы исследований**

Для настоящего исследования был выбран исторический рубеж XIX-XX вв. не случайно, так как именно в данном промежутке времени формируются основные закономерности в истории развития теории пограничного слоя.

В первой половине XIX в. сформировавшиеся представления о теории механики вязкой жидкости отвечали практическим запросам со стороны энергично развивавшихся гидродинамики и гидромеханики, учения о трении в машинах, физики и химии нефтяных и других смазочных веществ.

Первые опыты, показавшие преобладающее влияние сил вязкости на сопротивление при малых скоростях, принадлежали французскому физику, военному инженеру Шарлю Огюстену Кулону (1801 г.). В развитии термина «пограничный слой» основное значение имели теоретические и экспериментальные исследования сопротивления в трубах и каналах при движении в них воды и других вязких жидкостей. Обстоятельные экспериментальные исследования движения вязкой жидкости в трубах очень малого диаметра были проведены французским ученым Жаном Луи Мари Пуазейлем в 1840-1842 гг.

Более ранние опыты были проведены немецким физиком и гидростроителем Людвигом Хагеном в 1839 г. В результате теоретических и экспериментальных исследований в конце 1839 г. был сформулирован закон, определяющий расход жидкости при установившемся течении вязкой несжимаемой жидкости в тонкой цилиндрической трубе круглого сечения: закон Хагена-Пуазейля.

Теоретическое решение задачи исследования движения вязкой жидкости было обосновано в 1846 г. математиком, механиком и физиком-теоретиком Джорджем Габриелем Стоксом [1]. Решение задач пограничного слоя сводится в общей постановке к интегрированию сложных дифференциальных уравнений. Данные уравнения представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных и их интегрирование при заданных граничных условиях сопряженно с большими математическими трудностями не только в случае вязкого сжимаемого газа, но и в случае несжимаемой жидкости. Поэтому при решении задач пограничного слоя приходится прибегать к вычислению уравнений Навье-Стокса. Уравнения французского физика Анри Навье и британского математика Джорджа Стокса являются и в наши дни одними из важнейших в гидродинамике и применяются в математическом моделировании многих природных явлений и технических задач и в настоящее время.

Теория движения вязкой жидкости разрабатывалась главным образом в направлении изучения движения жидкости в тонком пограничном слое, образующемся вблизи поверхности тела при практически интересных скоростях и размерах тел.

По-видимому, шотландский инженер и физик Рэнкин Уильям Джон Макуори первый ввел понятие о пограничном слое. В своей записке, относящейся к 1864 г., он в следующих словах выражает происхождение сопротивления трения: «Это сопротивление представляет сочетание прямых и косвенных действий прилипания частиц воды к поверхности корабля, которую они обтекают; прилипание вместе с взаимной вязкостью частиц и производит бесчисленное множество мелких водоворотов в слое воды, непосредственно прилегающем к бортам судна» [2].

Возникновение термина «пограничный слой» уходит далеко вглубь истории образования отдельной науки гидродинамики. Традиционная гидродинамика сегодня находится на стадии насыщения, когда каждый шаг требует всевозрастающих усилий и затрат. Таким образом, без выдающихся открытий не возможно было бы создать отдельные науки по исследованию сопротивления трению.

В XVIII в. теоретические исследования движения жидкости проводились в большей части случаев на основе предположения, что жидкость является идеальной, т.е. не обладающей трением, и одновременно является несжимаемой. Только в XIX в. влияние трения и сжимаемости стали учитывать в большей мере. При движении жидкости без трения между отдельными ее соприкасающимися слоями возникают только нормальные силы (давления), касательные же силы (напряжения сдвига) отсутствуют.

Это означает, что идеальная жидкость не оказывает изменению формы никакого внутреннего сопротивления. Теория движения идеальной жидкости математически очень широко разработана и во многих случаях дает вполне удовлетворительную картину действительных движений. Такими случаями являются, например, волновое движение или движение с образованием струй. В то же время теория идеальной жидкости совершенно бессильна для решения проблемы вычисления сопротивления тела, движущегося в жидкости. В этом случае она приводит к результату, что тело, равномерно движущееся в неограниченно распространенной жидкости, не испытывает никакого сопротивления (это парадокс Жана Лерона Даламбера).

Важно отметить, что в формулировке парадокса говорится только об отсутствии составляющей силы, действующей на тело, которая параллельна потоку текучей среды на бесконечности (об отсутствии силы трения). Необходимо отметить то, что момент сил, действующих на тело со стороны потока, может быть отличен от нуля. Так, при безотрывном обтекании наклоненной к потоку пластинки или профиля тела даже при нулевой циркуляции скорости возникает момент сил, стремящийся повернуть пластинку или исследуемое тело поперек потока текучей среды.

При наличии объемных сил (например, силы тяжести) со стороны жидкости на тело может действовать сила Архимеда, однако ее нельзя считать составляющей силы сопротивления, ибо она не обращается в нуль в покоящейся жидкости.

В случае нарушения парадокса Жана Лерона Даламбера при обтекании тела реальным потоком жидкости всегда имеется ненулевая сила сопротивления, наличие которой объясняется нарушением тех или иных условий, входящих в формулировку парадокса Жана Лерона Даламбера [3]. В частности:

- если жидкость или текучая среда не является идеальной (обладает конечной вязкостью), может возникнуть сила сопротивления, прямо или косвенно связанная с действием вязкого трения;

- если движение тела в жидкости не является стационарным, то даже в модели невязкой жидкости возникает сила сопротивления инерционной природы, связанная с тем, что при движении тела с переменной скоростью кинетическая энергия окружающей жидкости меняется со временем;

- если течение не является непрерывным (например, в потоке имеются поверхности разрыва), то параметры потока далеко впереди и позади тела могут не совпадать, что приводит к ненулевому сопротивлению. Примером служит тело в плоском потоке, порождающее за собой цепочку сосредоточенных вихрей (модель вихревой дорожки Кармана);

- если жидкость не занимает все пространство вокруг тела, то парадокс Даламбера также может нарушаться. Типичными примерами являются: образование за телом уходящей в бесконечность полости, заполненной покоящейся жидкостью (схема струйных течений Кирхгофа – Гельмгольца, моделирующая кавитационную полость); образование волн на поверхности жидкости (гравитационные волны на воде), на создание которых требуются затраты энергии, что приводит к возникновению волнового сопротивления; аналогичную природу имеет сопротивление за счет возникновения внутренних волн при движении тела в стратифицированной жидкости (например, на границе двух слоев жидкости с разной плотностью);

- если параметры потока далеко впереди и позади тела не выравниваются, то сила сопротивления также может быть отлична от нуля. В частности, так обстоит дело при подводе тепловой энергии к потоку или при образовании за телом области («следа»), параметры в которой отличны от параметров в основном потоке на бесконечности.

В результате, если создать условия, в которых обтекание тела будет достаточно близко к условиям в формулировке парадокса Жана Лерона Даламбера, например, придать телу обте-

каемую (каплеобразную или эллипсоидальную) форму, то возможно добиться существенно – в десятки и сотни раз – снижения сопротивления по сравнению с плохообтекаемыми телами с тем же миделевым сечением.

В результате полученных как теоретических, так и экспериментальных изысканий согласно наблюдениям Менделеева и Даламбера возникли предпосылки в создании теории сопротивления тела в движущейся жидкости или текучей среде.

В продолжение исторического аспекта важно упомянуть то, что понятие ламинарное течение не применялось раньше, до 1917 г. в российской науке пользовались термином «струйчатое течение». Турбулентность экспериментально открыта английским физиком, механиком и инженером Осборном Рейнольдсом в 1883 г. при изучении течения воды в трубах.

Рейнольдс экспериментально установил (1876-1883 гг.) критерий перехода ламинарного режима движения жидкости, текущей в цилиндрической трубе, в турбулентный режим; данный критерий заключается в том, что введенная английским механиком безразмерная величина (названная в его честь числом Рейнольдса) превышает некоторое критическое значение. Применительно к турбулентному движению вывел дифференциальные уравнения осредненного движения жидкости, содержащие нерегулярные пульсационные добавки [4]. Ученый Осборн Рейнольдс сформулировал критерий подобия двух различных течений вязкой жидкости [5]. Критерий, или число Рейнольдса, приемлем при исследовании движения несжимаемой жидкости газа на малых и больших скоростях, в том числе и для установившегося движения.

Начало теории пограничного слоя положил в 1904 г. один из основателей прикладной гидромеханики, немецкий ученый, профессор Людвиг Прандтль.

Он определил пограничный слой как слой трения, или тонкий слой, на поверхности обтекаемого тела или летательного аппарата, в котором проявляется эффект вязкости. Пограничный слой характеризуется сильным градиентом скорости потока: скорость меняется от нулевой, на поверхности обтекаемого тела, до скорости потока вне пограничного слоя.

Понятие пограничного слоя было им впервые введено в статье «О движении жидкости при очень малом трении», представленной 12 августа 1904 г. на третьем Международном конгрессе математиков в Гейдельберге (Германия).

Возникновение пограничного слоя связано с явлением в жидкости количества движения, теплоты и массы, характеризуемых коэффициентом вязкости, теплопроводности и диффузии. Гидромеханик Прандтль, исследуя пограничный слой, выявляет зависимость коэффициента трения воды от числа Рейнольдса.

Немецкий ученый объясняет сопротивление формы (вихревое сопротивление) при обтекании тела жидкостью отрывом ее пограничного слоя (рис. 1). Отрыв пограничного слоя всегда связан с сильным образованием вихрей и с большой потерей энергии на кормовой части обтекаемого тела. Эти явления наблюдаются в первую очередь у плохо обтекаемых тел, например, у круглого цилиндра и шара (рис. 2).

В результате за кормовой частью таких тел образуется область сильно замедленного течения (так называемая застойная область), в которой распределение давления сильно отличается от распределения давления, соответствующего течению без трения. Именно это измененное, по сравнению со случаем идеальной жидкости, распределение давления, связанное с отрывом пограничного слоя, и является причиной большого сопротивления плохо обтекаемых тел.

Впоследствии Прандтлем будет предложен очень эффективный способ ламинаризации гидродинамического пограничного слоя с помощью его отсоса, который, в частности, эффективно реализован на «турбопарусе», установленном сначала на экспериментальном парусном катамаране «Moulin à Vent» (от французского «ветряная мельница») в 1983 г., а затем и судне Жака Кусто «Алсион» в 1985 г. (рис. 3) [6].

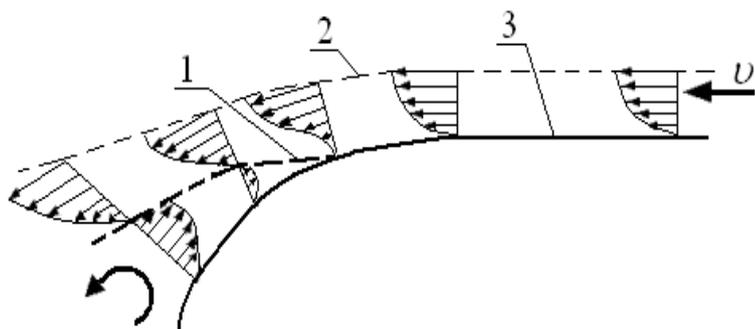


Рис. 1. Пограничный слой и его отрыв в кормовой оконечности судна:

1 – граница отрыва пограничного слоя;  
 2 – граница пограничного слоя;  
 3 – ватерлиния корпуса судна  
 ( $v$  – скорость набегающего потока)

Fig. 1. Boundary layer and its separation in the aft end of the vessel: 1 – boundary of the boundary layer separation;

2 – boundary of the boundary layer;  
 3 – waterline hull ( $v$  – free-stream velocity)

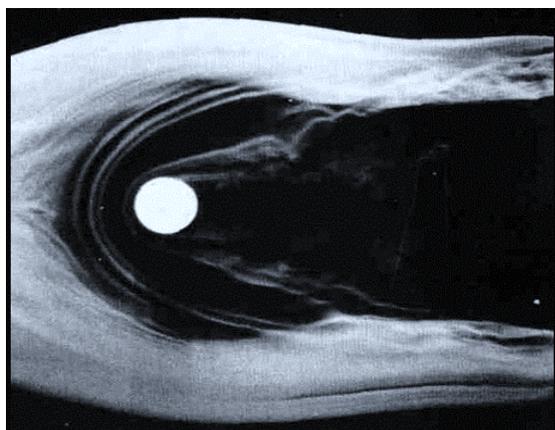


Рис. 2. Дымовая визуализация пограничного слоя перед цилиндром

Fig. 2. Smoke visualization of the boundary layer before the cylinder



Рис. 3. Французское научно-исследовательское судно «Алсион» ( $L = 27,4$  м;  $B = 9$  м;  $D = 76$  т;  $N = 230$  кВт), построенное по заказу Ж. Кусто для замены знаменитого «Калипсо», было оборудовано двумя турбопарусами, использующими для создания тяги отсос пограничного слоя

Fig. 3. French research vessel «Alsion» ( $L = 27,4$  м;  $B = 9$  м;  $D = 76$  т;  $N = 230$  кВт), built for the J. Cousteau to replace the famous «Calypso», was equipped with two turboparasami used to create traction boundary layer suction

Л. Прандтль указал направление гидродинамики, сделавшее доступным теоретическому исследованию течения жидкостей с очень малой вязкостью, из которых наиболее важными в техническом отношении являются вода и воздух. Для достижения этого достаточно было учитывать действие вязкости только там, где оно проявляется существенным образом, а именно в тонком «пограничном слое» вблизи стенки, обтекаемой жидкостью. Этот путь позволил дать теоретическое объяснение многим явлениям, ранее остававшимся совершенно непонятными.

Прежде всего, идея Л. Прандтля сделала доступными для теоретического исследования вопросы, связанные с сопротивлением, возникающим при обтекании жидкостью твердых тел. Бурно развивавшаяся судостроительная техника очень быстро извлекла из теоретических выводов многое, полезное для себя, и, в свою очередь, поставила перед новой теорией многочисленные проблемы. В настоящее время для инженера, работающего в области судостроения, понятие пограничного слоя стало настолько привычным, что без него он не может больше обойтись.

Дальнейшее развитие теория пограничного слоя получает в трудах (период 1923-1933 гг.) американского ученого Теодора фон Кармана – выдающегося механика, внесшего большой вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований в области гидродинамики. Наиболее популярные работы Кармана заключаются в исследовании автоколебательных движений в воде вертикальных круговых цилиндров. Позднее своеобразный след сорванного пограничного слоя за цилиндром получит название «вихревая дорожка Кармана». Как писал Т. фон Карман, «... Расположение вихрей, изображенных на рисунке (рис. 4), связано с моим именем; обычно его называют вихревая дорожка Кармана или вихревой след Кармана. Но я не претендую на открытие этих вихрей; они были известны задолго до моего рождения. ... Переменные вихри позади препятствий наблюдал и фотографировал английский ученый Генри Реджинальд Арнулфт Маллок, а затем профессор из Франции Анри Бенар. Бенар раньше меня проделал много работы, но он в основном наблюдал вихри в любой вязкой жидкости или коллоидных растворах и рассматривал их с точки зрения экспериментальной физики, а не аэродинамики. Тем не менее он отчасти ревновал, что вихревую систему связали с моим именем и несколько раз, например на Международном конгрессе по прикладной механике в Цюрихе (1926 год) и в Стокгольме (1930 год), настаивал на своем приоритете за первым наблюдением этого явления. В ответ я однажды сказал: «Согласен, то, что в Берлине и Лондоне называется «Карман – стрит», в Париже следует назвать «Авеню Авен Бернар». После этой остроты мы заключили мир и стали хорошими друзьями»<sup>1</sup> [7].

Несомненно, фундаментальный вклад в теорию исследования пограничного слоя внес Теодор фон Карман. Он первый доказал, что симметричное расположение вихрей, которое является очевидной заменой вихревого слоя, неустойчиво. Выдающийся механик Карман установил, что устойчивым может быть только асимметричное расположение переменных вихрей, и только для соотношения между рядами и расстояния между двумя последовательными вихрями каждого ряда (рис. 5).

Таким образом, теория пограничного слоя позволяет объяснить не только сопротивление трения, но – путем исследования отрыва – и сопротивление давления. Опасность отрыва пограничного слоя всегда существует в областях возрастания давления, и притом тем большая, чем резче происходит возрастание давления.

---

<sup>1</sup> Игра слов: вихревая дорожка по-английски называется «vortex street», как и «улица». Соответственно по-французски слово улица звучит как «avenue» – «авеню».



Рис. 4. Двойной ряд переменных вихрей позади кругового цилиндра  
 Fig. 4. Double row variables vortices behind a circular cylinder

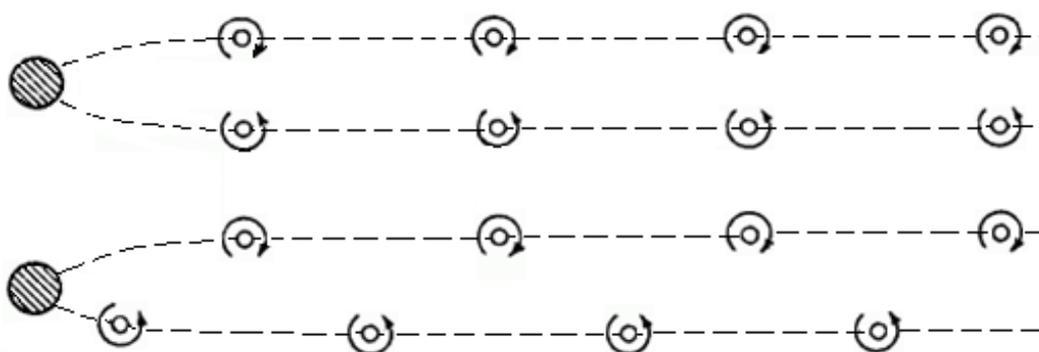


Рис. 5. Двойные ряды переменных вихрей: симметричное (вверху) и асимметричное (внизу) расположения  
 Fig. 5. Double rows of variables vortices symmetrical (top) and asymmetric (bottom) location

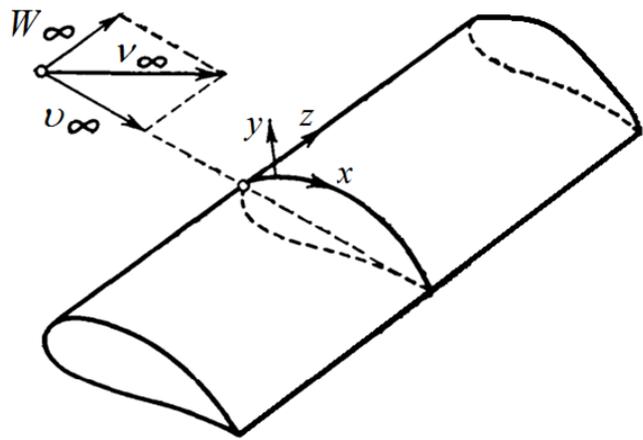
С этого момента проблема сопротивления в принципиальном отношении была решена, и началось бурное развитие теории пограничного слоя (невязкой и вязкой текучей среды): углублялись знание и понимание исследуемых явлений, разрабатывались эффективные методы анализа и успешно решались прикладные задачи, а теоретическая гидродинамика оказывала все большее влияние на формирование облика обтекаемых тел.

С 1934 по 1941 гг. советские ученые-гидродинамики Константин Федяевский и Лев Лойцянский создают современную теорию пограничного слоя, причем последний детально исследует физическую природу вихревого сопротивления. К.К. Федяевский и Л.Г. Лойцянский в своих трудах описывают результаты экспериментального анализа ламинарного и турбулентного пограничных слоев. Советские ученые разработали теорию плоского (составляющие вектора скорости зависят только от двух координат, в направлении третьей координатной оси никакой скорости нет) и пространственного пограничного слоя (составляющие скорости имеются во всех трех координатных направлениях и при этом зависят от всех трех координат, рис. 6). До середины XX в. способы расчета общего случая пространственного пограничного слоя вызывали у ученых математические трудности.

До недавнего времени при расчете пограничных слоев ограничивались исключительно случаями плоского и осесимметричного течений. В случае анализа течения вблизи диска, вращающегося в покоящейся жидкости, теория плоского пограничного слоя неприемлема, так как она не раскрывает причину возникновения вторичных течений. При течении в межлопаточном канале турбинной или насосной решетки и при обтекании поворотной лопатки в пограничных слоях на боковых стенках лопаток возникают вторичные течения. Причиной их

возникновения является кривизна линий тока внешнего сечения. В межлопаточном канале вторичное течение направлено от напорной поверхности одной лопатки к подсосывающей поверхности соседней лопатки. К этому вторичному течению, вызванному обтеканием боковой стенки, присоединяется еще влияние пограничного слоя на самих лопатках, вследствие чего течение через межлопаточный канал представляет собой весьма сложную трехмерную задачу [8]. Данный пример свидетельствует о необходимости экспериментальной теории пространственного пограничного слоя.

Рис. 6. Система координат для трехмерного пограничного слоя  
Fig. 6. The coordinate system for three-dimensional boundary layer



В конце XX в. ученые в области гидродинамики заинтересовались явлением теплопередачи между твердым телом и жидкой или газообразной текучей средой. Явление теплопередачи между твердым телом и жидкой или газообразной текучей средой представляет собой проблему механики потоков. В рассматриваемой задаче на механическое течение налагается тепловой поток, и в общем случае два потока влияют один на другой. Для того чтобы найти распределение температуры, необходимо знать гидродинамические уравнения движения с уравнениями теплопроводности. Из чисто наглядных соображений понятно, что распределение температуры около нагретого тела, обтекаемого жидкостью, часто должно обладать особенностями, характерными для пограничного слоя.

В итоге в конце 1960 г. Георгием Никитичем Кружилиным было введено понятие «тепловой пограничный слой», аналогичное понятию «гидродинамический пограничный слой». Что положило начало детальному исследованию ламинарного и турбулентного пограничных слоев. Труды Г.Н. Кружилина посвящены экспериментальному установлению распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности тела, расчетам теплового пограничного слоя, теории теплоотдачи при конденсации пара и кипении жидкости и исследованиям уноса влаги паром в котлах.

Исследования перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный впервые были выполнены И. М. Бюргерсом и М. Ханзенем. Эти исследования показали, что для такого перехода наиболее характерным признаком является внезапное резкое увеличение толщины пограничного слоя и касательные напряжения на стенке обтекаемого текучей средой тела вращения.

Проблемой сопротивления трения в жидкостях и газах занимались многие ученые еще до появления теории пограничного слоя. Среди них Ш.О. Кулон, Ж.Л.М. Пуазейль, Д.И. Менделеев и др. Теоретические разработки теории пограничного слоя были начаты Прандтлем и развиты А. Бенаром, Т. фон Карманом и др. Развитию теории пограничного слоя посвящено большое количество работ советских исследователей: К.К. Федяевского,

Л.Г. Лойцянского, Г.Н. Кружилина и др. Отечественные ученые провели ряд важных теоретических и экспериментальных исследований пограничного слоя, разработали рациональные формы тел, имеющих малое сопротивление трения и обтекаемых без срыва потока до больших углов атаки.

### **Результаты и их обсуждение**

Формирование пограничного слоя на поверхности – это явление, с одной стороны, доставляющее немало хлопот и проблем в гидродинамике, а с другой стороны – лежащее в основе формирования физических и химических свойств воды в живом организме.

В процессе работы над исследованием теории пограничного слоя в приложении гидравлики, целью которого является изучение актуальности таких исследований, была выявлена разносторонняя направленность теории пограничного слоя. Данные результаты определяются прогрессом научных направлений и совершенствованием измерительной техники.

Сравнительный анализ экспериментов, сложившихся исторически, привел к сравнительной хронологии событий, выдержанных аспектами развития направленности особенностей поведения жидкостного слоя по отношению к обтекаемым поверхностям.

Обсуждение данных аспектов приводится в результате исследования поведения вязкого пограничного слоя и в настоящее время. Примером таких исследований и результатом обсуждений является одно из научно-исследовательских направлений, в частности «Изучение пограничного слоя ламинарного потока жидкости в гладкой трубе методом фотокоррекцияционной спектроскопии ламинарного пограничного слоя» [9]. При данном научном направлении не исключается и направленность научного познания в сфере турбулентности пограничного слоя.

На данном этапе результативными являются работы, изложенные в патентных изысканиях.

Содержание статьи охватывает только основополагающие аспекты теории пограничного слоя на рубеже XIX-XX вв. Обсуждение данного научного аспекта продолжает свое развитие в таких экспериментальных результатах, как способы управления пограничным слоем в условиях как ламинарного течения, так и турбулентного течения. Данный результат позволяет в дальнейшем продолжить научный анализ результатов и их обсуждений на хронологическом этапе в биотехнологических исследованиях.

### **Выводы**

Исследования теории пограничного слоя в настоящее время являются актуальными, так как большинство ученых все чаще и чаще обращают свое внимание на поиск новых методов и способов управления пограничным слоем. Основываясь на исторических фактах, ученые-экспериментаторы ищут пути совершенствования управления жидкой и газообразной текучими средами.

Особое внимание привлекает гидродинамический пограничный слой, так как отрыв пограничного слоя влечет за собой образование турбулентности при изменении скорости симметричного или асимметричного тела вращения с удобовыгодным миделевым сечением.

Теория пограничного слоя широко используется в авиастроении и судостроении. Подчас именно теория сопротивления трению при движении летательного аппарата или судна характеризует внешний облик данных объектов, что существенно сказывается на стадии проектирования летательного аппарата и судна в целом. Понять прикладной характер теории пограничного слоя невозможно без анализа исторического развития теории сопротивления трению.

Насущной задачей исследования теории пограничного слоя является подготовка и настройка специализированных методов и программ, необходимых для достоверной оценки нетрадиционных методов управления пограничным слоем, которые должны появиться в недалеком будущем.

### Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газов. – М.: Дрофа, 2008. – 928 с.
2. Тюлина И.А. История и методология механики. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 282 с.
3. Grimberg G., Pauls W., Frisch U. Genesis of d'Alembert's paradox and analytical elaboration of the drag problem // *Physica D*. – 2008. – Т. 237. – Р. 1878-1886.
4. Боголюбов А.Н. Математики. Механики. Биографический справочник. – Киев: Наукова думка, 1983. – 639 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – 3-е изд. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
6. Мытник Н.А. Краткая история корабельных наук (хронология событий с комментариями). – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2004. – 12 с.
7. Карман Т. Аэродинамика. Избранные темы в их историческом развитии. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 208 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / пер. с нем. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
9. Пат. 2117828 Российская Федерация, F15D1/02, F17D1/18. Устройство для снижения трения в трубопроводах и шлангах; заявитель и патентообладатель А.А. Титов; Н.И. Жданов; Г.С. Ляпин. – № 96111737/06; заявл. 10.06.1996; опубл. 20.08.1998, Бюл. № 13 (II ч.).

**Сведения об авторе:** Плоткина Виктория Александровна, старший преподаватель,  
e-mail: vika\_plotkina@mail.ru.

УДК 621.431.74.016

**Б.И. Руднев, О.В. Повалихина**Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА  
ИЗЛУЧЕНИЕМ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Проанализированы особенности расчета оптико-геометрических характеристик излучения применительно к полуразделенной камере сгорания (КС) дизельного двигателя типа 8ЧН 13/14, представлены расчетные значения угловых коэффициентов излучения, полученные с учетом переменной геометрии излучающей системы. Отмечается, что между характером излучения угловых коэффициентов в функции относительного радиуса цилиндра и распределением радиационных тепловых потоков по поверхностям КС имеется четкая корреляция.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, камера сгорания, оптико-геометрические характеристики излучения, локальный радиационный тепловой поток.

**B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina****OPTICAL-GEOMETRICAL DATA RADIATIVE HEAT TRANSFER IN DIESEL  
ENGINE COMBUSTION CHAMBER**

*Features of calculation optical-geometrical data radiative heat transfer applied to diesel engine combustion chamber are analyzed. Calculation data of angle coefficients radiation applied to diesel engine combustion chamber of type 8 CHN 13/14 are presented. Correlation between of variation angle coefficients and radiative heat transfer considered in the article.*

**Key words:** diesel engine, combustion chamber, optical-geometrical data radiative heat transfer, local radiative heat flux.

**Введение**

Достоверное определение теплонапряженного состояния деталей, образующих КС дизельных двигателей, на стадии проектирования все еще вызывает у конструкторов значительные трудности. Это объясняется сложностью процесса локального радиационного теплообмена между рабочим телом и стенками КС и несовершенством существующих математических моделей (ММ), использующихся для его описания. Последнее заставляет исследователей искать новые подходы, направленные на совершенствование существующих ММ и включение в их состав элементов, позволяющих более детально описывать различные аспекты локального радиационного теплообмена в КС современных дизельных двигателей.

**Геометрия излучающей системы дизельного двигателя с полуразделенной камерой сгорания и ее особенности**

В настоящей работе рассматриваются элементы модифицированной ММ локального радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя типа 8ЧН 13/14, в которой учитывается взаимодействие только собственного потока излучения объемной зоны  $V$  и соответствующих граничных (поверхностных) зон  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  (рис. 1). ВМТ – верхняя мертвая точка; НМТ – нижняя мертвая точка. Основные положения этой ММ сводится к следующему. Процесс радиационного теплообмена в цилиндре дизельного двигателя с полуразделенной КС на установившемся режиме работы рассматривается нами на адекватной физической модели. Она представляет из себя замкнутую осесимметричную цилиндрическую излучающую систему.



ные и расчетные методы [6, 7] позволяют задавать локальные значения оптических и энергетических характеристик объемных зон  $V_i$ .

Полное решение задачи должно включать распределение радиационных тепловых потоков по поверхностям днища поршня, крышки и втулки цилиндра, т.е.

$$\begin{aligned} E_{над1,2,3} &= f(R, h, t), \\ E_{эф1,2,3} &= f(R, h, t), \\ E_{рез1,2,3} &= f(R, h, t). \end{aligned} \tag{1}$$

где  $E_{над}$  – падающий поток излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{эф}$  – эффективный поток излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{рез}$  – результирующий поток излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $t$  – текущее время рабочего процесса, с;  $R$  – радиус цилиндра двигателя, м;  $h$  – текущий ход поршня, м.

Однако в нашем случае эффективное излучение от поверхности крышки цилиндра, поршня и втулки не учитывается, и решение задачи сводится к нахождению результирующего потока  $E_{рез1,2,3} = f(R, h, t)$ , который будет приближенно равен падающему потоку  $E_{над1,2,3} = f(R, h, t)$ . Из алгебраической аппроксимации точного решения исходных интегральных уравнений излучения [4] для падающего потока имеем

$$E_{над}(M_k) = \sum_{\gamma=1}^n E_{соб}(M_\gamma) \Phi(M_\gamma, F_k) + \sum_{v=1}^m E_{соб}(M_v) \Phi(M_v, F_k), \tag{2}$$

где  $E_{соб}$  – собственный поток излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Phi(M_v, F_k)$  – разрешающий угловой коэффициент;  $v$  – объемная зона в КС;  $k$  – номер поверхностной зоны;  $m$  – номер объемной зоны.

В уравнении (2) первым слагаемым учитывается собственное излучение поверхностей  $F_1, F_2$  и  $F_3$  (см. рис. 1) и, как показано в [4], его вкладом в  $E_{над}(M_k)$  можно пренебречь, т.е. положить

$$\sum_{\gamma=1}^n E_{соб}(M_\gamma) \Phi(M_\gamma, M_k) = 0. \tag{3}$$

Тогда падающий поток излучения можно определить по уравнению

$$E_{над}(M_k) = \sum_{v=1}^m E_{соб}(M_v) \Phi(M_v, F_k). \tag{4}$$

В рассматриваемой нами ММ радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя принято, что излучающая система не отражает излучение границами и не рассеивает его в объеме. В [8] была показана возможность отнесения частиц дизельной сажи к малым, вследствие этого рассеиванием излучения можно пренебречь. Отмеченные условия, как показано в [9], приводят к тому, что значение разрешающих угловых коэффициентов вырождается в соответствующее значение углового коэффициента излучения:

$$\Phi(M_v, F_k) = \varphi(M_v, F_k). \tag{5}$$

Подставляя (5) в (4), получим

$$E_{\text{над}}(M_k) = \sum_{v=1}^m E_{\text{собо}}(M_v) \varphi(M_v, F_k), \quad (6)$$

где  $\varphi(M_v, F_k)$  – геометрический угловой коэффициент.

Переход к системе с поглощающей средой может быть осуществлен с использованием зависимости

$$\psi(M_v, F_k) = \varphi(M_v, F_k) \exp(-kL), \quad (7)$$

где  $\psi(M_v, F_k)$  – обобщенный угловой коэффициент;  $k$  – показатель ослабления излучения,  $\text{м}^{-1}$ ;  $L$  – эффективная длина пути луча, м.

С учетом (7) уравнение для падающего потока излучения от объемной зоны  $V$  на граничные поверхностные зоны  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  запишется следующим образом:

$$E_{\text{над}}(M_k) = \sum_{v=1}^m E_{\text{собо}}(M_v) \psi(M_v, F_k) \exp(-kL). \quad (8)$$

### Определение геометрических и обобщенных угловых коэффициентов излучения

Для расчета геометрических угловых коэффициентов излучения  $\varphi(M_v, F_k)$  использовались уравнения, представленные в [3]. В частности, выражение для углового коэффициента излучения граничной поверхности  $F_2$  (см. рис. 1) на объемную зону  $V$  определенного радиуса  $r_i$  имеет вид [3]

$$\varphi_{12} = R \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{X}{Z}\right) \right] - \frac{\pi Z}{4H} - \frac{1}{2\pi H} \left[ \sqrt{(X+2)^2 - 4R^2} \arccos\left(\frac{RX}{Z}\right) - X \arcsin R \right]. \quad (9)$$

Угловой коэффициент излучения объемной зоны  $V$  радиуса  $r_i$  на граничную поверхность  $F_2$  (т.е. на поверхность втулки цилиндра) определяется по зависимости [3]

$$\varphi_{21} = \frac{1}{R} \varphi_{12}, \quad (10)$$

а угловой коэффициент излучения от объемной зоны  $V$  на граничную поверхность  $F_3$  (поверхность дна поршня) соответственно

$$\varphi_{23} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{R} \varphi_{12} \right). \quad (11)$$

В уравнениях (9)-(11) приняты следующие обозначения:

$$R = r_2/r_1; \quad H = h/r_i; \quad X = H^2 + R^2 - 1; \quad Z = H^2 - R^2 + 1. \quad (12)$$

С учетом симметрии излучающей системы угловой коэффициент от объемной зоны  $V$  на граничную поверхность  $F_1$  (поверхность крышки цилиндра) будет равен коэффициенту  $\varphi_{23}$ .

При расчете локальных радиационных тепловых потоков в КС дизельного двигателя необходимо учесть, что значения всех параметров (за исключением  $R$ ), определяемых соотношениями (12), зависят от угла ПКВ, т.е. являются переменными. Связь параметров  $H$ ,  $X$  и  $Z$  с текущим углом ПКВ осуществляется по известной зависимости для кривошипно-шатунного механизма двигателя:

$$S = \bar{R} \left( 1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right). \quad (13)$$

В соответствии с принятой зональной излучающей системой (см. рис. 1) текущее значение перемещения поршня

$$S_i = h_0 + h_i \quad (14)$$

или 
$$S_i = h_0 + \bar{R} \left( 1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right), \quad (15)$$

для любого фиксированного угла ПКВ при расчете угловых коэффициентов излучения с учетом схемы, представленной на рис. 1, используется выражение

$$h = h_0 \bar{R} \left( 1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right), \quad (16)$$

где  $\bar{\lambda}$  – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Тогда для параметров, определяющихся по (12), имеем

$$R = r_i/R'. \quad (17)$$

$$H = h/r_i = \left( h_0 + \bar{R} \left( 1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right) \right) / r_i. \quad (18)$$

$$X = H^2 + R^2 - 1 = \left[ \left( h_0 + \bar{R} \left( 1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right) \right) / r_i \right]^2 + (r_i/R')^2 - 1. \quad (19)$$

$$Z = H^2 - R^2 + 1 = \left[ \left( h_0 + \bar{R} \left( 1 - \cos \alpha + 0,5\bar{\lambda} \sin^2 \alpha \right) \right) / r_i \right]^2 - (r_i/R')^2 + 1. \quad (20)$$

Полный вид расчетных зависимостей для обобщенных угловых коэффициентов излучения ввиду их громоздкости здесь не приводится и имеется в [4]. Расчет угловых коэффициентов излучения выполнялся на ПК по специальной программе. Результаты расчетов показаны на рис. 2, 3 и 4.

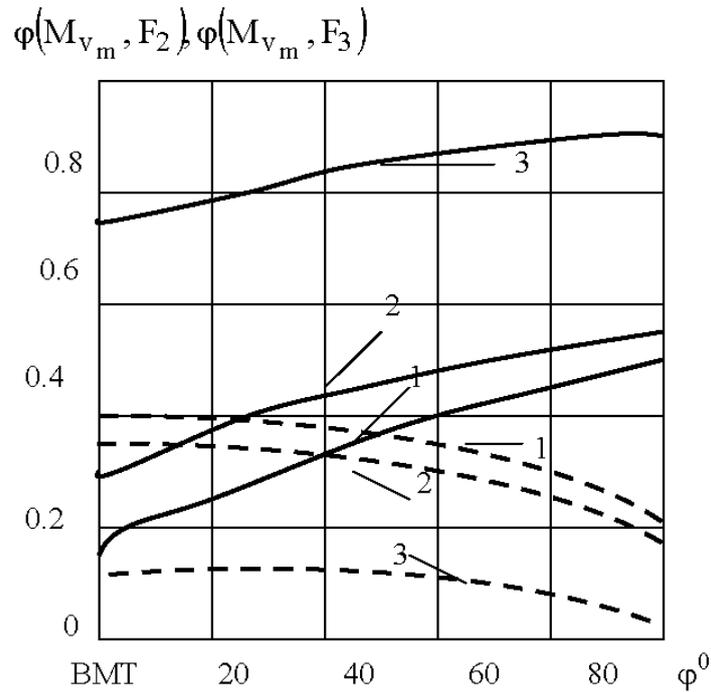


Рис. 2. Изменение угловых коэффициентов излучения от объемных зон на поверхности втулки цилиндра и поршня: —  $\varphi(M_{V_m}, F_2)$ ; ----  $\varphi(M_{V_m}, F_3)$ ;

1 —  $V_1$  при  $r_1 = 10$  мм; 2 —  $V_2$  при  $r_2 = 30$  мм; 3 —  $V_1$  при  $r_3 = 57$  мм

Fig. 2. Variation angle coefficients radiation from volume of zones on surface line cylinder and piston:

1 —  $V_1$  for  $r_1 = 10$  mm; 2 —  $V_2$  for  $r_2 = 30$  mm; 3 —  $V_1$  for  $r_3 = 57$  mm

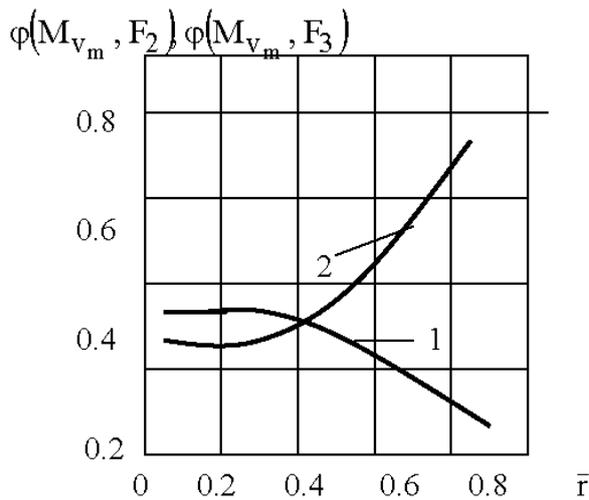


Рис. 3. Изменение угловых коэффициентов излучения от объемных зон по поверхности КС (положение коленчатого вала  $20^\circ$  после БМТ): 1 —  $\varphi(M_{V_m}, F_3)$ ; 2 —  $\varphi(M_{V_m}, F_2)$

Fig. 3. Variation angle coefficients radiation from volume of zones on surface combustion chamber (crank angle 20 degrees after TDC): 1 —  $\varphi(M_{V_m}, F_3)$ ; 2 —  $\varphi(M_{V_m}, F_2)$

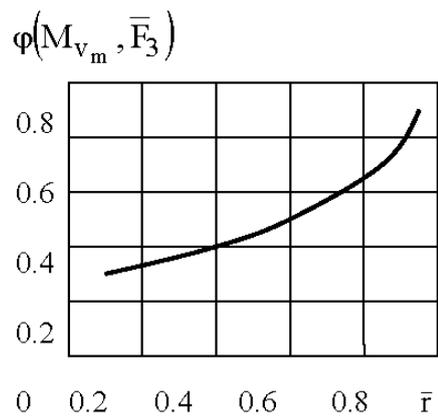


Рис. 4. Изменение угловых коэффициентов излучения от объемных зон на боковую поверхность выемки в поршне

Fig. 4. Variation angle coefficients radiation from volume of zones on lateral surface of piston

Анализ представленных на них графиков позволяет сделать весьма важный вывод о том, что угловой коэффициент от объемных зон на поверхность втулки цилиндра  $\varphi(M_{v_m}, F_2)$  с увеличением угла ПКВ возрастает, а на поверхности крышки цилиндра и днище поршня  $\varphi(M_{v_m}, F_3)$  уменьшается.

Причем, чем меньше радиус объемной излучающей зоны, тем больше значение углового коэффициента излучения на поверхности крышки цилиндра и поршня  $\varphi(M_{v_m}, F_3)$ . Для углового коэффициента от объемных зон на поверхность втулки цилиндра  $\varphi(M_{v_m}, F_2)$  зависимость от радиуса имеет обратную тенденцию. На рис. 4 показано изменение углового коэффициента излучения от объемных зон  $\varphi(M_{v_m}, \bar{F}_3)$  на боковую поверхность выемки в поршне  $\bar{F}_3$  (см. рис. 1) в функции ее относительно радиуса. Из этого графика можно заключить, что боковая поверхность выемки в поршне  $\bar{F}_3$  подвергается значительным радиационным тепловым нагрузкам. Последнее подтверждается и экспериментальными данными [10].

Такой характер изменения угловых коэффициентов излучения  $\varphi(M_{v_m}, F_3)$  и  $\varphi(M_{v_m}, F_1)$  приводит к тому, что расчетные значения локальных радиационных тепловых потоков достигают своего максимума в центре КС.

Это положение хорошо согласуется с экспериментальными данными [11] и свидетельствует о правильном учете основных особенностей радиационного теплообмена в КС дизельного двигателя при построении ММ.

Переход от геометрических коэффициентов излучения, представленных на рис. 2-4, к соответствующим значениям обобщенных угловых коэффициентов выполняется по зависимости (7). При этом характер изменения обобщенных угловых коэффициентов излучения в функции угла ПКВ и относительного радиуса излучающего объема остается прежним.

Детальные расчеты, результаты которых представлены в [4], показали, что поглощение в объеме КС дизельного двигателя не превышает 5-10 % от величины падающего потока излучения.

### **Заключение**

Проведенный анализ особенностей расчета оптико-геометрических характеристик теплообмена излучением применительно к КС дизельного двигателя позволяет отметить следующее. Имеющиеся в научно-технической литературе формулы и графические зависимости для определения угловых коэффициентов излучения справедливы для систем, содержащих тела и поверхности относительно простой геометрической формы и находящихся в стационарном положении. В условиях работающего дизельного двигателя геометрия излучающей системы изменяется в зависимости от угла ПКВ, что существенно усложняет решение оптико-геометрической части задачи теплообмена излучением. Полученные авторами доклада расчетные данные по изменению угловых коэффициентов излучения между объемными зонами и поверхностями, образующими КС (поверхности крышки цилиндра, втулки и поршня), в зависимости от угла ПКВ и относительного радиуса имеют два аспекта применения. Первый аспект – для решения энергетической части задачи теплообмена излучением и расчета результирующих потоков излучения по вышеуказанным поверхностям КС. Второй аспект – для определения наиболее нагруженных в термическом отношении участков этих поверхностей, так как характер изменения угловых коэффициентов излучения в функции относительного радиуса КС коррелирует с распределением радиационных тепловых потоков. Последнее позволяет прогнозировать теплонпряженное состояние деталей цилиндропоршневой группы и решать ряд вопросов, связанных с повышением эксплуатационной надежности современных дизельных двигателей.

### Список литературы

1. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Математические модели механизма и электродинамики сплошной среды. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 512 с.
2. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ / Р.М. Петриченко, С.А. Батурин, Ю.Н. Исаков и др. / под ред. Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. – 328 с.
3. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
4. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 221 с.
5. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Процессы теплообмена в камере сгорания дизельных двигателей. Эксперимент и математическое моделирование. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 с.
6. Kawamura K., Saito A., Vaegashi T. et al. Measurement of flame temperature distribution in engines by using a two-color high speed shutter: TV camera system // SAE Preprints. – 1989. – № 890320. – 8 p.
7. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 472 с.
8. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Оптические параметры частиц сажи и энергетические характеристики радиационного теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5, № 10. – С. 476-480.
9. Рубцов Н.А. Теплообмен излучением в сплошных средах. – Новосибирск: Наука, 1984. – 278 с.
10. Dent J.C., Siluman S.I. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection diesel engine // SAE Preprints. – 1977. – № 770407. – 26 p.
11. Kostin A.K., Rudnev B.I. Radiative heat transfer in a diesel cylinder an experiment and method of calculation // Heat and mass transfer in gasoline and diesel engines: Proc. 19<sup>th</sup> International Symposium. Dubrovnik, Yugoslavia, 1987. – P. 439-448.

**Сведения об авторах:** Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор;  
Повалихина Ольга Владимировна, доцент, e-mail: povalichina@mail.ru.