

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

Институт транспорта и логистики
Кафедра двигателей внутреннего сгорания

УТВЕРЖДАЮ
Директор института транспорта и логистики
Быкадоров В.В.
« 26 » 02 2025 г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по учебной дисциплине
ВОЛНОВЫЕ ОБМЕННИКИ ДАВЛЕНИЯ

(наименование учебной дисциплины, практики)

13.03.03. Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки (специальности))

«ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ»

(наименование профиля подготовки (специальности, магистерской программы); при отсутствии ставится прочерк)

Разработчик:

ст. преп. _____ А.С.Ковтун

ФОС рассмотрен и одобрен на заседании кафедры двигателей внутреннего сгорания
(наименование кафедры)

от «25» 02.2025 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой _____ А.А. Данилейченко
(подпись)

Луганск 2025 г.

**Комплект оценочных материалов по дисциплине
«Волновые обменники давления»**

Задания закрытого типа

Задания закрытого типа на выбор правильного ответа

Выберите один правильный ответ

1. В каком диапазоне лежат средние значения номинальной частоты вращения ротора волнового обменника давления?

- А) 2000...3000 об/мин
- Б) 4000...6000 об/мин
- В) 7000...16000 об/мин.
- Г) 18000...25000 об/мин
- Д) 30000...50000 об/мин

Правильный ответ: В

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

2. Максимальные значения общего КПД волнового обменника достигают:

- А) 0,2...0,3
- Б) 0,45...0,57.
- В) 0,65...0,7
- Г) 0,73...0,78
- Д) 0,8...0,85

Правильный ответ: Б

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

3. Как изменяется угол относительного смещения передних кромок окон высокого давления волнового обменника при увеличении частоты вращения ротора и неизменных других параметрах?

- А) линейно возрастает.
- Б) возрастает по квадратной параболе
- В) линейно уменьшается
- Г) уменьшается по гиперболе
- Д) не изменяется

Правильный ответ: А

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

4. Какое из газообменных окон волнового обменника имеет наибольший размер?

- А) отвода высокого давления
- Б) отвода низкого давления.
- В) подвода высокого давления
- Г) подвода низкого давления
- Д) все окна одинакового размера

Правильный ответ: Б

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

Задания закрытого типа на установление соответствия

Установите правильное соответствие.

Каждому элементу левого столбца соответствует только один элемент правого столбца.

1. Найти соответствие между указанными элементами системы наддува ДВС с волновым обменником давления и их назначением.

- | | |
|---|--|
| 1) Пусковой клапан | А) Снижение времени отклика волнового обменника по увеличению давления наддува на неустановившихся режимах двигателя. |
| 2) Регулировочный клапан | Б) Удаление прорвавшихся в картер двигателя газов и отвод их в выпускную систему обменника. |
| 3) Эжектор картерных газов | В) Подвод воздуха в цилиндры ДВС через байпасный канал от воздухоочистителя или непосредственно из атмосферы. Предотвращение попадания отработавших газов во впускной коллектор на пусковых режимах при недостаточной продувке ячеек ротора. |
| 4) Заслонка впускного тракта волнового обменника давления | Г) Регулирование рециркуляции отработавших газов с целью снижения эмиссии NO_x .
Д) Ограничение давления наддува при полной нагрузке путем перепуска части сжимающего горячего газа из линии ПВД в выпускной тракт волнового обменника давления. |

Правильный ответ: 1-В, 2-Д, 3-Б, 4-Г

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

2. Найти соответствие между изменением режимных параметров и их влиянием на показатели рабочего процесса волнового обменника давления

- | | |
|--|---|
| 1) Повышение температуры атмосферного воздуха | А) Ухудшение продувки ячеек. Уменьшение массового заряда цилиндров ДВС, повышение его температуры. |
| 2) Увеличение разрежения на впуске и противодавления выпуска | Б) Существенное ухудшение показателей работы обменника, вызванное рассогласованием фаз движения газодинамических волн с окнами низкого и высокого давления. |
| 3) Повышение объёмной пропускной способности | В) Увеличение давления наддува и адиабатного КПД обменника при |

ротора

неизменном уровне остаточного давления в ячейках ротора.

- 4) Отклонение частоты вращения ротора от расчетного значения
- Г) Возрастание затрат энергии на сжатие воздуха. Снижение плотности и расхода наддувочного воздуха на выходе из окна ВВД
- Д) Неоднозначное влияние на эффективные показатели рабочего цикла обменника. Наличие ярко выраженного экстремума адиабатного КПД.

Правильный ответ: 1-Г, 2-А, 3-Д, 4-Б

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

3. Найти соответствие между изменением конструктивных параметров и их влиянием на показатели рабочего процесса волнового обменника давления

- 1) Уменьшение угловых размеров окон ВВД и ГВД
- А) Повышение КПД и расширение области эффективной работы в направлении номинального режима ДВС. Незначительное снижение степени повышения давления.
- 2) Уменьшение площади проходного сечения окна ГВД
- Б) Увеличение скорости потока в окне ВВД, снижение расхода и давления сжатого воздуха, повышение остаточного давления и улучшение продувки ячеек ротора на режимах полных и средних нагрузок.
- 3) Увеличение отношения углового смещения передних кромок окон высокого давления к угловому размеру окна ВВД
- В) До определенного момента увеличивается КПД обменника. Интенсификация первичной волны разрежения. Увеличение потерь на трение по длине канала. Усиление подогрева воздушного заряда от стенок ячеек.
- 4) Увеличение числа ячеек ротора
- Г) Увеличение качества продувки ячеек на фоне повышения напорности и КПД обменника.
- Д) Возрастание давления и скорости истечения горячего газа, расхода и давления наддувочного воздуха. С некоторого момента снижается КПД.

Правильный ответ: 1-Б, 2-Д, 3-А, 4-В

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

4. Найти соответствие между указанными параметрами волнового обменника давления и их определением.

- 1) Критерий подобия S_{Rel}
- А) Доля суммарной торцевой площади стенок ячеек от общего проходного

- сечения торца ротора.
- | | |
|---|---|
| 2) Коэффициент загромождения проточной части ротора продольными перегородками | Б) Степень использования пропускной способности ротора. |
| 3) Адиабатический КПД волнового обменника | В) Произведение объёма проточной части ротора на частоту вращения. |
| 4) Объёмная пропускная способность ротора | Г) Отношение адиабатной работы сжатия рабочего тела (холодного воздуха) в ячейках ротора к энтальпии потока отработавшего газа. |
| | Д) Отношение адиабатных теплоперепадов сжимаемой (холодного воздуха) и сжимающей (горячего газа) рабочих тел. |

Правильный ответ: 1-Б, 2-А, 3-Д, 4-В

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

Задания закрытого типа на установление правильной последовательности

Установите правильную последовательность.

Запишите правильную последовательность букв слева направо.

1. В какой последовательности движется сжимающая среда (горячий газ) в волновом обменнике давления прямооточного типа?

- А) через окно газа высокого давления (ГВД) в ячейки ротора.
- Б) через окно ОНД в патрубок газа низкого давления (ГНД).
- В) из патрубка ГНД в атмосферу.
- Г) от источника подвода тепла в патрубок подвода высокого давления (ПВД).
- Д) из ячеек ротора в окно отвода низкого давления (ОНД).

Правильный ответ: Г, А, Д, Б, В

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

2. В какой последовательности движется сжимаемая среда (холодный воздух) в волновом обменнике давления прямооточного типа?

- А) из ячеек ротора в окно воздуха высокого давления (ВВД).
- Б) через окно ВВД в патрубок отвода высокого давления (ОВД).
- В) через окно воздуха низкого давления (ВНД) в ячейки ротора.
- Г) из патрубка ОВД на линию нагнетания.
- Д) нагнетается продувочным вентилятором в патрубок подвода низкого давления (ПНД).

Правильный ответ: Д, В, А, Б, Г

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

3. В какой последовательности распространяются газодинамические волны в ячейке ротора волнового обменника при согласованной настройке частоты вращения, угловых смещений окон и параметров сжимающей среды?

- А) волна разрежения, движущаяся от окна ГВД к окну ВВД.

Б) ударная волна, распространяющаяся от окна ГВД к окну ВВД, и сжимающая неподвижный воздух в ячейке.

В) волна сжатия, образующаяся после отключения ячейки от окна ВВД, движущаяся от окна ВВД к окну ГНД.

Г) волна разрежения, распространяющаяся от окна ГНД к окну ВНД.

Д) отраженная от окна ВВД волна давления или разрежения, движущаяся к окну ГВД.

Правильный ответ: Б, Д, А, В, Г

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

4. В какой последовательности распространяются газодинамические волны в ячейке ротора волнового обменника с карманами при занижении частоты вращения ротора относительно расчетного значения?

А) образование обводного потока, поддерживающего продувочный импульс в ячейке ротора.

Б) формирование волны разрежения, распространяющейся от задней кромки окна ГВД к окну ВВД.

В) ударная волна распространяется от окна ГВД к окну ВВД и приходит к торцу ротора раньше его сообщения с окном ВВД.

Г) образование волны разрежения, распространяющейся от передней кромки окна ГНД к расширительному карману.

Д) в компрессионном кармане создается избыточное давление и формируется отраженная волна сжатия, распространяющаяся к окну ГВД.

Правильный ответ: В, Д, Б, Г, А

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

Задания открытого типа

Задания открытого типа на дополнение

Напишите пропущенное слово (словосочетание).

1. Если направления движения потоков рабочих тел не _____, то тип такого обменника давления называется прямоточным.

Правильный ответ: меняются/ изменяются.

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

2. Энергетическим источником продувочного импульса ячеек ротора волнового обменника является остаточное _____ в ячейке.

Правильный ответ: давление

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

3. Отношение давления в окне ОВД к давлению в окне ПНД называется степенью повышения _____

Правильный ответ: давления

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

4. С увеличением расчетной длины ротора волнового обменника при прочих равных условиях расчетная _____ вращения ротора уменьшается.

Правильный ответ: частота

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

Задания открытого типа с кратким свободным ответом

1. Как называется агрегат прямого преобразования энергии рабочих тел в форме волнового взаимодействия?

Правильный ответ: волновой обменник давления / волновой обменник/ ВОД

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

2. Определить площадь окна ВВД, если угол раскрытия окна равен 40° , а площадь кольцевого сечения торца ротора волнового обменника между внутренним и наружным диаметрами равна 314 см^2 . *Ответ представить в виде округленного целого числа.*

Правильный ответ: 35

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

3. Частота вращения ротора $n = 10000$ об/мин. Какова линейная скорость v точек наружного диаметра $d = 0,3 \text{ м}$. *Ответ представить в виде округленного целого числа.*

Правильный ответ: 157

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

4. Чем осуществляется принудительная продувка ячеек ротора волнового обменника?

Правильный ответ: вентилятором

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

Задания открытого типа с развернутым ответом

Решите задачу.

1. Каким должно быть угловое смещение передних кромок окон высокого давления $\Delta\varphi_{1-2}$ для волнового обменника давления с длиной ротора $L_R = 150 \text{ мм}$, если на данном режиме скорость распространения вдоль ячеек первичной волны давления $D_1 = 435 \text{ м/с}$, а частота вращения ротора $n_R = 7000$ об/мин.

Критерии оценивания: полное содержательное соответствие приведенному ниже пояснению.

Время выполнения: 20 мин.

Ожидаемый результат:

Решение:

Условием выбора углового смещения передних кромок окон высокого давления является подход первичной волны сжатия к окну ГВД в момент когда

рассматриваемая ячейка повернется на искомый угол $\Delta\varphi_{1-2}$. С этого момента начнется сообщение ячейки с окном ВВД. Математически это условие выражается в равенстве времени поворота ротора на угол $\Delta\varphi_{1-2}$ и времени прохождения ударной волны длины ячейки

$$t = \frac{\Delta\varphi_{1-2}}{\omega_R} = \frac{L_R}{D_1},$$

где $\Delta\varphi_{1-2}$ берется в радианной мере: $\Delta\varphi_{1-2} [\text{рад}] = \Delta\varphi_{1-2} [\text{град}] \cdot \pi/180$.

Учитывая, что угловая скорость и частота вращения связаны соотношением

$$\omega_R = \frac{\pi \cdot n_R}{30}.$$

Окончательно искомое угловое смещение в градусной мере определяется по формуле

$$\Delta\varphi_{1-2} = 6 \frac{L_R \cdot n_R}{D_1} = \frac{6 \cdot 150 \cdot 10^{-3} \cdot 7000}{435} = 14,48^\circ$$

Правильный ответ: Угловое смещение передних кромок окон высокого давления должно быть равно $14,48^\circ$.

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

2. Определить массовый расход наддувочного воздуха, создаваемый волновым обменником, если угол раскрытия окна ВВД равен 36° , наружный диаметр ротора $D_H = 140$ мм, внутренний диаметр $D_B = 70$ мм, степень повышения давления $\pi_K = 1,73$, давление атмосферного воздуха $p_0 = 100$ кПа, температура наддувочного воздуха $t_2 = 160$ °С, средняя скорость потока через окно ВВД $u_2 = 75$ м/с.

Критерии оценивания: полное содержательное соответствие приведенному ниже пояснению.

Время выполнения: 20 мин.

Ожидаемый результат:

Решение:

По определению массового расхода сплошной среды

$$G_2 = \rho_2 \cdot u_2 \cdot F_2.$$

Т.к. при давлениях и температурах в цикле волнового обменника давления рабочие тела можно считать идеальными газами. Плотность ρ_2 наддувочного воздуха определяется из уравнения состояния идеального газа по температуре t_2 и давлению p_2 наддувочного воздуха, сжимаемого в обменнике

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R_B T_2} = \frac{\pi_K \cdot p_0}{R_B (t_2 + 273)} = \frac{1,73 \cdot 100}{0,287 (160 + 273)} = 1,39 \text{ кг/м}^3,$$

где $R_B = 0,287$ кДж/кгК – газовая постоянная воздуха.

Площадь окна ВВД определяется по формуле кругового сектора с центральным углом φ_2

$$F_2 = \pi \frac{D_H^2 - D_B^2}{4} \frac{\varphi_2}{360} = 3,14 \frac{14^2 - 7^2}{4} \frac{36}{360} = 11,54 \text{ см}^2.$$

Массовый расход сжатого воздуха через окно ВВД

$$G_2 = \rho_2 \cdot u_2 \cdot F_2 = 1,39 \cdot 75 \cdot 11,54 \cdot 10^{-4} = 0,12 \text{ кг/с}.$$

Массовый расход наддувочного воздуха равен $0,12$ кг/с.

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

3. Вычислить объемную пропускную способность ротора волнового обменника при частоте вращения $n_R = 9200 \text{ мин}^{-1}$. Наружный диаметр $D_H = 200 \text{ мм}$, внутренний диаметр $D_B = 110 \text{ мм}$, длина ротора $L_R = 140 \text{ мм}$, толщина перегородок $\delta = 1,5 \text{ мм}$, число ячеек $Z = 50$ штук.

Критерии оценивания: полное содержательное соответствие приведенному ниже пояснению.

Время выполнения: 20 мин.

Ожидаемый результат:

Решение:

Объемная пропускная способность ротора – это произведение объема V_R проточной части ротора на частоту вращения

$$W_R = V_R \cdot n_R.$$

Объем проточной части ротора является разностью кольцевого объема между внутренним и наружным цилиндром и суммарным объемом радиальных перегородок, образующих ячейки

$$V_R = \pi \frac{D_H^2 - D_B^2}{4} \cdot L_R - \frac{D_H - D_B}{2} \cdot \delta \cdot Z = 3,14 \frac{20^2 - 11^2}{4} \cdot 14 - \frac{20 - 11}{2} \cdot 0,15 \cdot 50 = 3032 \text{ см}^3.$$

При частоте вращения 9200 об/мин W_R равна

$$W_R = V_R \cdot n_R = \frac{3032 \cdot 10^{-6} \cdot 9200}{60} = 0,4649 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Правильный ответ: Объемная пропускная способность ротора волнового обменника при частоте вращения 9200 об/мин составляет 0,4649 м³/с (27,89 м³/мин или 464,9 л/с).

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

4. Какую работу необходимо совершить, чтобы изначально неподвижный ротор волнового обменника привести во вращение с частотой 15000 мин⁻¹. Момент инерции ротора относительно оси вращения $J_R = 0,012 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Трением о воздух и в подшипниковом узле пренебречь.

Критерии оценивания: полное содержательное соответствие приведенному ниже пояснению.

Время выполнения: 20 мин.

Ожидаемый результат:

Решение:

Работу привода можно определить по теореме об изменении кинетической энергии тела, согласно которой это изменение равно сумме работ внутренних i -тых и внешних j -тых сил, действующих на тело

$$\Delta E_R = \sum A_i + \sum A_j.$$

Т.к. по условию задачи механическое сопротивление вращению ротора не оказывается, то работы сил трения о воздух и в подшипниках равны нулю. Приложенная к валу механическая энергия в виде работы привода полностью идет на увеличение кинетической энергии ротора

$$\Delta E_R = A_{\text{пр}}$$

Поскольку ротор обменника изначально не вращался, то приращение кинетической энергии равно кинетической энергии на конечной заданной частоте вращения 15000 мин⁻¹

$$\Delta E_R = E_R$$

Кинетическая энергия вращения твердого тела определяется уравнением

$$E_R = \frac{J_R \cdot \omega^2}{2} = \frac{J_R}{2} \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2 = \frac{0,012}{2} \left(\frac{3,14 \cdot 15000}{30} \right)^2 = 14789 \text{ Дж.}$$

Правильный ответ: Работа привода $A_{\text{пр}}$, которую необходимо затратить для разгона ротора волнового обменника от неподвижного состояния до 15000 об/мин составляет 14789 Дж.

Компетенции (индикаторы): ПК-1 (ПК-1.3)

Экспертное заключение

Представленный фонд оценочных средств (далее - ФОС) *по дисциплине «Волновые обменники давления»* соответствует требованиям ФГОС ВО.

Предлагаемые оценочные материалы адекватны целям и задачам реализации основной профессиональной образовательной программы по направлению подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение.

Виды оценочных средств, включенные в представленный фонд, отвечают основным принципам формирования ФОС.

Разработанные и представленные для экспертизы оценочные материалы рекомендуются к использованию в процессе подготовки обучающихся по указанному направлению.

Председатель учебно-методической
комиссии института транспорта и логистики



Е.И. Иванова

Лист изменений и дополнений

№ п/п	Виды дополнений и изменений	Дата и номер протокола заседания кафедры (кафедр), на котором были рассмотрены и одобрены изменения и дополнения	Подпись (с расшифровкой) заведующего кафедрой (заведующих кафедрами)