

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВПУСКНЫХ КАНАЛОВ ШЕСТИЦИЛИНДРОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА МИНСКОГО МОТОРНОГО ЗАВОДА

*Кухаренок Г. М.*¹, д-р. техн. наук, проф.; *Предко А. В.*², инж.,

¹Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: *kux@tut.by*,

²ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод», г. Минск, Республика Беларусь,
e-mail: *MMZ.UGK.NS@yandex.by*

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF INLET CHANNELS OF SIX-CYLINDER ENGINES MANUFACTURED BY MINSK MOTOR PLANT

*G. Kukhareнок*¹, Doctor of Engineering Science, Professor,
*A. Predko*², engineer

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: *kux@tut.by*,

²The OJSC “MINSK MOTOR PLANT” Holding Managing Company”,
Minsk, Belarus, e-mail: *MMZ.UGK.NS@yandex.by*

С целью проверки возможности унификации отливок головок газопоршневого двигателя MMZ-262CNG и дизеля Д-262 проведена сравнительная оценка параметров впускных каналов указанных двигателей. Оценка пропускной способности каналов и интенсивности воздушного вихря проводилась по результатам статической продувки впускных каналов газообмена на виртуальной установке путем моделирования потоков. Моделирование потоков проводилось при высотах подъема клапана $h_{кл} = 2-13$ мм, одинаковых граничных условиях – давление и температура на входе $P_{вх} = 101325$ Па, $T_{вх} = 293,2$ К; на выходе $P_{вых} = 100304$ Па, $T_{вых} = 293,2$ К. В качестве

основных параметров, характеризующих свойства каналов, приняты эффективное проходное сечение канала μ_f и вихревое отношение Ω . Проведена верификация модели путем сравнения результатов виртуальной и натурной продувок впускных каналов. Выявлена удовлетворительная сходимость результатов виртуального и натурального эксперимента. В результате моделирования определено, что впускные каналы двигателя MMZ-262CNG обладают более низкой пропускной способностью, на 17 % при $h_{кл} = 13$ мм, и повышенной способностью к генерации вихревого движения воздушного заряда в цилиндре дизеля, на 18 % за такт впуска. Проведен анализ структуры потока воздуха по сечениям впускного канала MMZ-262CNG. В результате анализа обнаружена область паразитного завихрения потока, являющаяся причиной снижения пропускной способности и повышенного сопротивления канала. Сделано заключение о невозможности прямого использования впускных каналов MMZ-262CNG в дизеле Д-262.

Ключевые слова: впускной канал, расход воздуха, эффективное проходное сечение, коэффициент закрутки, линии тока, моделирование потоков, статическая продувка.

In order to test the possibility of unifying the castings of the heads of the MMZ-262CNG gas piston engine and the D-262 diesel engine, a comparative assessment of the parameters of the inlet channels of these engines was carried out. The estimation of the channel throughput and the intensity of the air swirl was carried out according to the results of static blowing of the gas exchange inlet channels on a virtual installation by modeling the flows. Simulation of flows was carried out at valve lift heights $h_{кл} = 2-13$ mm, the same boundary conditions – pressure and temperature at the inlet $P_{вх} = 101325$ Pa, $T_{вх} = 293,2$ K; at the outlet $P_{вых} = 100304$ Pa, $T_{вых} = 293,2$ K. The effective flow area of the channel μ_f and the swirl ratio Ω are taken as the main parameters characterizing the properties of the channels. The model was verified by comparing the results of virtual and real blowing of inlet channels. A satisfactory convergence of the results of the virtual and real experiments was revealed. As a result of the simulation, it was determined that the intake channels of the MMZ-262CNG engine have a lower throughput, by 17 % at $h_{кл}=13$ mm, and an overestimated ability to generate a swirl motion of an

air charge in a diesel cylinder, by 18 % per intake stroke. The analysis of the structure of the air flow along the area of the MMZ-262CNG inlet channel has been carried out. As a result of the analysis, an area of parasitic flow vortex was found, which became the reason of a decrease in the throughput and an increase in the hydraulic resistance of the channel. It was concluded that direct use of MMZ-262CNG inlets in the D-262 diesel engine is impossible.

Key words: inlet channel, air flow rate, effective flow area, swirl ratio, streamlines, flow simulation, static blowdown.

Введение

От количества и параметров состояния воздушного заряда, находящегося в цилиндре зависят эффективность процессов смесеобразования и сгорания, и как следствие индикаторные и эффективные показатели двигателя [1, 2]. Для организации высокоэффективного процесса сгорания дизельного [2, 3] и газопоршневого [4] двигателей необходимо создание направленного движения воздушного заряда требуемой интенсивности. Степень соответствия интенсивности вихревого движения заряда оказывает на рабочий процесс значительное воздействие, согласно работе [2] в дизельном двигателе «несоответствие топливных факелов и интенсивности вихря ведет к снижению мощности до 25 %». От аэродинамического сопротивления впускных каналов зависит наполняемость цилиндров свежим рабочим телом, воздухом для дизелей и горючей смесью в случае газопоршневого двигателя с внешним смесеобразованием, и как следствие максимальная мощность, развиваемая двигателем [3, 5]. Вопрос совершенствования впускных каналов являются актуальной проблемой двигателестроения [6, 7].

Объекты исследования

В линейке шестицилиндровых двигателей, выпускаемых ОАО «УКХ «ММЗ», находятся дизели семейств Д-260, Д-262 и газопоршневые двигатели MMZ-262CNG. Газопоршневой двигатель разработан на базе дизеля Д-262. По условиям компоновки топливной аппаратуры разработана новая конструкция головки цилиндров с впускными каналами имеющими боковой вход.

Объектами исследования являются впускные каналы газопоршневого и дизельного двигателей размерности 110×140 мм.

Впускные каналы имеют существенные конструктивные различия: входные отверстия у каналов головки MMZ-262CNG боковые, со стороны расположения свечей зажигания, и индивидуальные; у каналов головки Д-262 входы выполнены вертикально, причем каналы 2 и 3 цилиндров имеют общий вход.

Диаметры горловины каналов и параметры клапанной щели у обоих двигателей идентичны. 3D модели головок взяты из документации MMЗ.

Общий вид проточных частей впускных каналов представлены на рисунке 1.

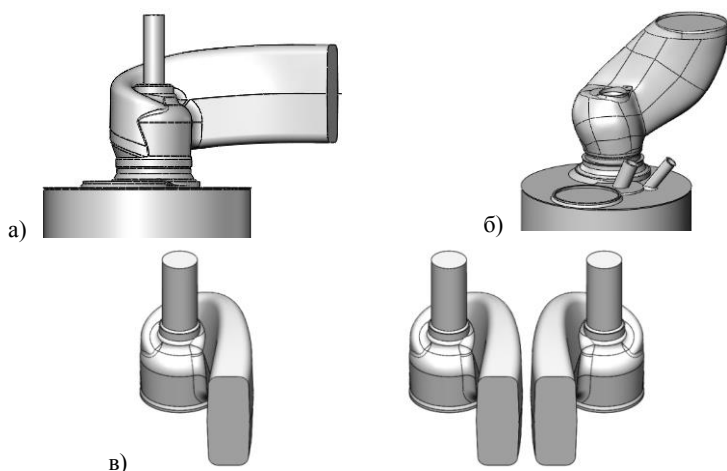


Рисунок 1 – Проточные части впускных каналов двигателей
а) MMZ-262CNG; б) Д-262; в) расположение каналов в головке
двигателя MMZ-262CNG

Методика определения аэродинамических свойств впускных каналов

Определение свойств каналов проводилось на «виртуальном» продувочном стенде (рисунок 2) с использованием FloFD приложения, позволяющем моделировать течение вязкой теплопроводящей жидкости [8, 9, 10].

Моделирование потоков проводилось при высотах подъема клапана $h_{кл} = 2-13$ мм, одинаковых граничных условиях – давление и температура на входе $P_{вх} = 101325$ Па, $T_{вх} = 293,2$ К; на выходе $P_{вых} = 100304$ Па, $T_{вых} = 293,2$ К, что соответствует условиям продувки на безмоторной установке по методике ММЗ [6, 7, 11]. Условия на стенках – адиабатные стенки с шероховатостью $R_z = 50$ мкм.

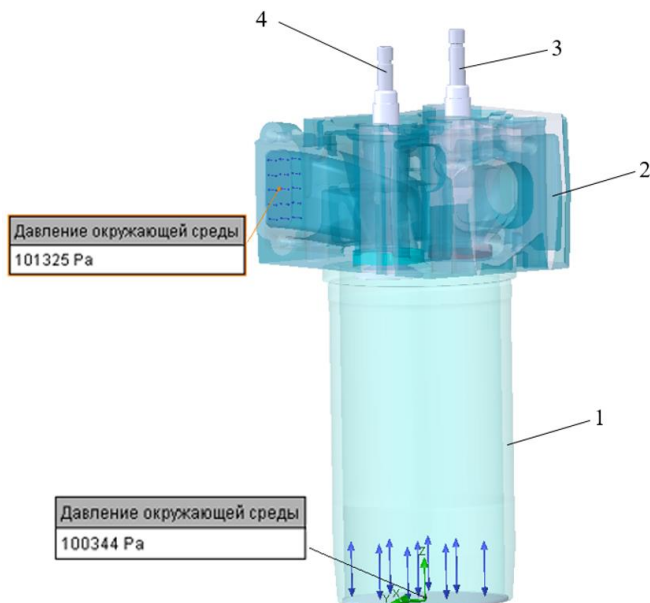


Рисунок 2 – Виртуальная установка для продувки впускных каналов
 1 – гильза цилиндра; 2 – головка дизеля с исследуемыми каналами;
 3 – выпускной клапан; 4 – впускной клапан

В результате моделирования определялся массовый расход воздуха $M_{сек}$, окружная скорость воздушного потока на выходе из цилиндра w_t относительно его оси, средний радиус цилиндрической системы координат r_{cp} , анализировалось распределение скорости и линии тока в канале, клапанной щели и цилиндре [7, 12].

Для обработки полученных данных использовались следующие зависимости:

– эффективное проходное сечения [7, 13]:

$$\mu f = \frac{M_{сек}}{M_m} \cdot f_{кл} = \frac{M_{сек}}{W_m \cdot \rho_k},$$

где M_m – теоретический расход воздуха; $f_{кл}$ – проходная площадь клапанной щели; W_m – теоретическая скорость истечения; ρ_k – плотность воздуха на выходе из канала;

– усредненная угловая скорость воздушного заряда [7, 14]:

$$\omega = \frac{w_t}{r_{cp}};$$

– момент количества движения [2, 14]:

$$M_{кр} = \omega \cdot M_{сек} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2,$$

где D – диаметр цилиндра ($D = 110$ мм);

– коэффициент закрутки K [7]:

$$K = \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot S \cdot \rho_k}{M_{сек}^2},$$

где S – ход поршня, $S = 140$ мм;

– вихревое отношение, отношение угловой скорости вращения воздушного заряда в цилиндре в конце впуска к угловой скорости коленчатого вала двигателя:

$$\Omega = \frac{\pi}{2} \int \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot S \cdot \rho_k}{M_{сек}^2} \cdot f(\alpha) \frac{ds}{S},$$

где α – угол поворота коленчатого вала; $f(\alpha)$ – функция скорости поршня, равная отношению мгновенной скорости поршня к скорости кривошипа; S – текущее положение поршня.

Аэродинамические характеристики впускных каналов двигателя MMZ-262CNG и Д-262

Результаты виртуальной продувки представлены на рисунке 3.

Суммарное вихревое отношение Ω составило:

– для двигателя MMZ-262CNG $\Omega = 5,11$;

– для дизеля Д-262 $\Omega = 4,19$.

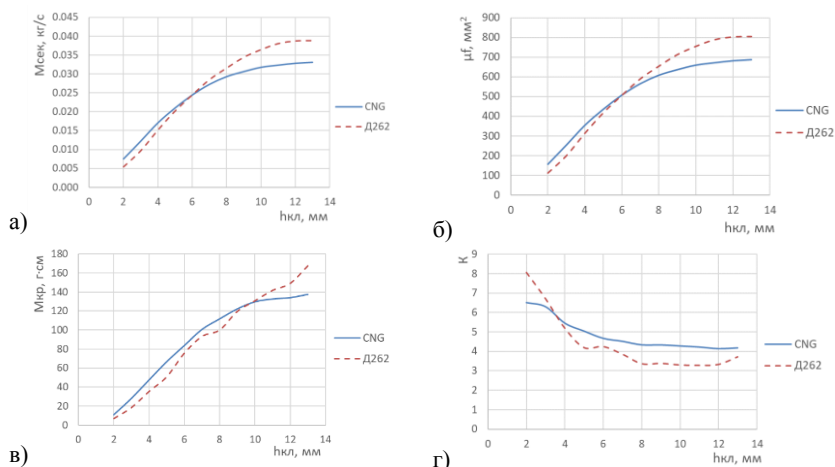


Рисунок 3 – Результаты виртуальной продувки впускных каналов двигателей Д-262 и MMZ-262CNG, зависимости

- а) массового расхода воздуха $M_{сек}$; б) эффективного проходного сечения μf ;
 в) расчетного момента на решетке $M_{кр}$; г) коэффициента закрутки воздушного заряда K от высоты подъема клапана $h_{кл}$

Из результатов продувки можно сделать следующие выводы:

– пропускная способность впускных каналов двигателя MMZ-262CNG при высотах подъема клапана $h_{кл} = 8–13$ мм существенно ниже чем у дизеля Д-262, что отрицательно сказывается на наполнении цилиндров. При $h_{кл} = 13$ мм потери в эффективном проходном сечении μf составляют 17 %;

– способность генерировать воздушный вихрь каналов MMZ-262CNG выше чем у каналов Д-262. Суммарное вихревое отношение Ω у каналов MMZ-262CNG составляет 5,11, что на 18 % превышает интенсивность вихря, создаваемого каналами головки дизеля Д-262. Для нормальной организации процесса смесеобразования для дизелей с системой впрыска непосредственного действия отношение Ω должно находиться в пределах 3–4,5 [1 ,15].

Стоит иметь в виду, что виртуальная продувка проводилась для 3D-моделей. Характеристики реальных каналов, полученных в результате литья в земляные формы, могут существенно отличаться как от моделей, так и между собой в одной головке [7].

С целью верификации проведено сравнение результаты моделирования и натурной продувки впускных каналов головок цилиндров MMZ 262CNG и Д-260.4 (рисунок 4) на безмоторной установке.

Результаты натурного эксперимента можно оценить двояко.

С одной стороны, результаты натурной и виртуальной продувки сопоставимы как по расходу, так и по крутящему моменту на спрямляющей решетке. Сходимость результатов можно считать удовлетворительной.

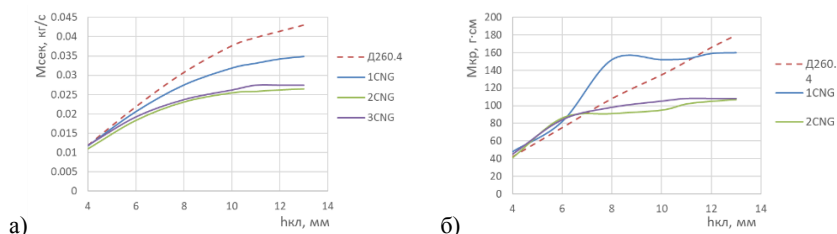


Рисунок 4 – Результаты натурной продувки впускных каналов двигателей Д-260.4 и MMZ-262CNG, зависимости а) массового расхода воздуха $M_{сек}$; б) момента на решетке $M_{кр}$ от высоты подъема клапана

С другой стороны, результаты продувки на безмоторной установке показывают существенные различия свойств каналов в одной отливке как по пропускной способности, так и по моменту на решетке. Разность по расходу воздуха при $h_{кл} = 13$ мм достигает 24 %, по моменту на решетке 33 %.

Учитывая схожесть поведения кривых расхода воздуха и момента на решетке у 2 и 3 цилиндров можно сделать предположение, что негативное влияние на результаты статической продувки оказывает близкое расположение входных портов каналов и подвод воздуха общим патрубком. Для уточнения влияния данного явления на наполнение цилиндров необходимо провести дополнительные натурные исследования по определению расхода воздуха через входные порты одинарных и сдвоенных каналов.

Анализ структуры потока во впускном канале MMZ-262CNG

В идеальном канале по мере продвижения воздушного потока от входного сечения к клапанной щели скорость должна равномерно увеличиваться. Зоны замедления потока и тем более вихреобразования нежелательны [3, 5, 12]. Рассмотрим структуру потока во впускном канале по горизонтальным сечениям.

Распределение скорости в верхнем сечении подводящего участка равномерное, в начале участка наблюдается некоторое увеличение скорости, по мере входа потока в спиральную камеру поток притормаживается (рисунок 5).

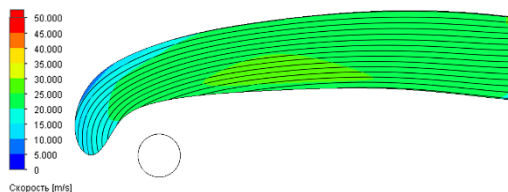


Рисунок 5 – Распределение скорости в подводящем участке

По мере продвижения потока в спиральную камеру на внешнем участке наблюдается зона торможения потока (рисунки 6 а, б, в), на внутренней части перехода от подводящего канала к спиральной камере наблюдается возникновение зоны паразитного завихрения (рисунки 6 б, в), которая в дальнейшем развивается (рисунок 7) и является причиной затенения части проходного сечения клапанной щели. В паразитном вихре потенциальная и кинетическая энергия потока

превращается в теплоту, идет процесс диссипации энергии, он является причиной уменьшения пропускной способности сечения и повышения гидравлического сопротивления.

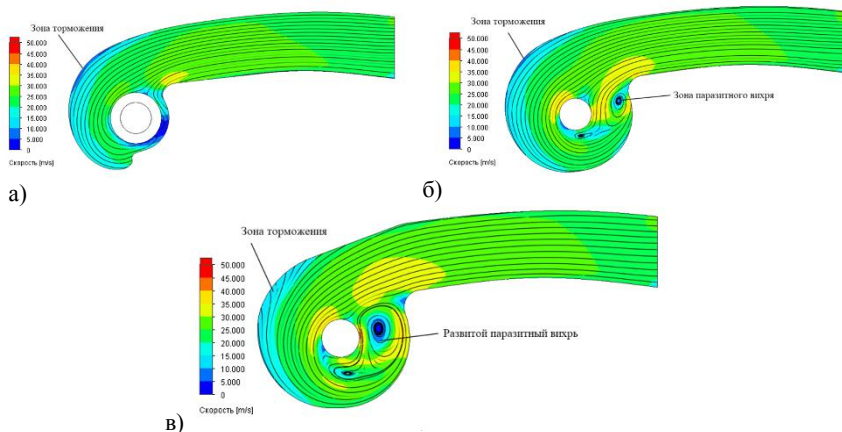


Рисунок 6 – Распределение скорости в подводящем участке камеры закрутки а) – в) различные сечения по высоте

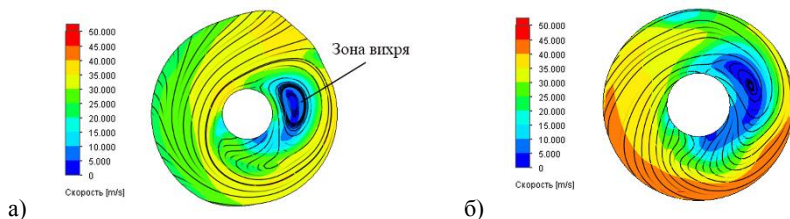


Рисунок 7 – Распределение скорости в камере закрутки а), б) различные сечения по высоте

По периметру клапанной щели наблюдается неравномерное распределение скорости потока, максимальная скорость достигается в месте противоположном зоне образования паразитного вихря (рисунок 8). Неравномерное распределение скорости по периметру клапанной щели свидетельствует о снижении пропускной способности канала и росте его гидравлического сопротивления.

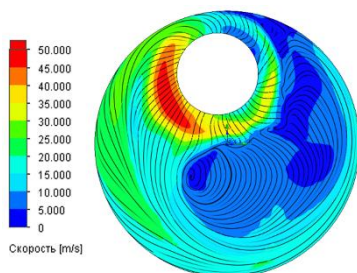


Рисунок 8 – Распределение скорости на выходе из клапанной щели в цилиндр

Были проведены подобные исследования для серийного индивидуального впускного канала головки дизеля Д-262, обнаруженные паразитные завихрения имеют меньший масштаб и интенсивность, и в силу большего поперечного сечения канала оказывают меньшее влияние на пропускную способность канала.

Заключение

В результате моделирования определены характеристики впускных каналов газопоршневого двигателя MMZ-262CNG и дизельного двигателя Д-262. Впускные каналы двигателя MMZ-262CNG обладают более низкой пропускной способностью и повышенной способностью к генерации вихревого движения воздушного заряда в цилиндре дизеля.

При максимальной высоте подъема клапана эффективное проходное сечение μf впускного канала двигателя MMZ-262CNG составляет 687 мм^2 , что на 17 % меньше чем у дизеля Д-262.

Суммарное вихревое отношение Ω у впускного канала MMZ-262CNG составляет 5,11. Для организации нормального процесса смесеобразования для двигателей семейства Д-262 с топливной аппаратурой непосредственного действия Ω должна находиться в пределах 3,5–4,5, для дизелей с аккумуляторной системой топливоподачи 3–4.

Проведен анализ структуры потока воздуха по сечениям впускного канала MMZ-262CNG. В результате анализа обнаружена область паразитного завихрения потока, являющаяся причиной снижения пропускной способности и повышения гидравлического сопротивления канала.

Прямое использование впускных каналов MMZ-262CNG в дизеле Д-262 может привести к ухудшению параметров рабочего процесса.

Литература

1. Кухаренок, Г. М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования / Г. М. Кухаренок – Минск : БГПА, 1999. – 180 с.
2. Кавтарадзе, Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов / Р. З. Кавтарадзе. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 589 с.
3. Вихерт, М. М. Конструирование впускных систем быстроходных дизелей / М. М. Вихерт, Ю. Г. Грудский. – М. Машиностроение, 1982. – 151 с.
4. Дьяченко, В. Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Учебник / В.Г. Дьяченко – Перевод с украинского языка. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 500 с.
5. Драганов, Б. Х. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания / Б. Х. Драганов, М. Г. Круглов, В. С. Обухова. – Киев : Вища школа, Головное издательство, 1987. – 175 с.
6. Кухаренок, Г. М. Профилирование впускного канала малогабаритного дизеля / Г. М. Кухаренок, М. А. Клессо, А. В. Предко // Актуальные вопросы машиноведения : сборник научных трудов. Выпуск 9. – Минск : ГНУ ОИМ НАН Беларуси, 2020. – С. 79–83.
7. Кухаренок, Г. М. Оценка аэродинамических свойств впускных каналов дизеля / Г. М. Кухаренок, А. В. Предко // Наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету «Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування», Харків, 16–18 вересня 2020 р. – Харьков : ХНАДУ, 2020. – С. 357–358.
8. ANSYS FLUENT 14/0 User's Guide/ ANSYS Inc., 2011.
9. Алямовский, А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Понмарев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

10. Кухаренок, Г. М. Определение показателей впускных каналов с использованием виртуального стенда продувки / Г. М. Кухаренок, А. В. Предко, К. Н. Юрчук // Вместе к эффективному движению! Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – Минск : БНТУ, 2008. – С. 262–265.

11. Предко, А. В. Методы экспериментального исследования закручивающих впускных каналов / А. В. Предко // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в БГПА. Материалы международной 51-ой НТК БГПА. – Минск : БГПА, 1995. – С. 78–79.

12. Предко, А. В. Моделирование течения во впускном канале ДВС / А. В. Предко // Наука – образованию, производству, экономике Материалы Четвертой МНТК В 2 томах Том 1. – Минск : БНТУ, 2006 – С. 262–265.

13. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

14. Кухаренок, Г. М. Математическая модель вращения воздушного заряда в цилиндре дизеля / Г. М. Кухаренок, А. В. Предко // Вестник БНТУ. – 2002. – № 4. – С. 50–54.

15. Кухаренок, Г. М. Организация рабочего процесса шестицилиндрового тракторного дизеля / Г. М. Кухаренок, М. А. Клессо, А. В. Предко, Д. А. Телюк // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 29 января 2021 г. – М. : МАДИ, 2021. – С. 233–244.

Статья поступила 03.11.2021