

Расчетное исследование возможности реализации сверхвысокой степени сжатия в поршневом двигателе внутреннего сгорания

09, сентябрь 2013

DOI: 10.7463/0913.0622287

Сакулин Р. Ю., Ахтямов И. И., Шаяхметов В. А., Яковлев П. Б.

УДК 621.43.054

Россия, Уфимский государственный авиационный технический университет

laminar_burn@mail.ru

ilnar_u4aly@mail.ru

vadyashayah@mail.ru

yak21@live.ru

Введение

Создание экологически безвредного и экономичного рабочего процесса поршневого двигателя внутреннего сгорания является одной из основных задач современного энергетического машиностроения. Из теории поршневых двигателей [1] известно, что с увеличением предварительного сжатия рабочего тела, уменьшается количество топлива, необходимое для получения единицы мощности. То есть для повышения эффективности перспективного рабочего процесса необходимо увеличение степени сжатия.

Такой способ повышения эффективности рабочего процесса уже был неоднократно использован на практике. Так, значение степени сжатия бензиновых автомобильных двигателей 30 – 40-х годов находилось в пределах 4 – 6. Современные двигатели с принудительным воспламенением имеют степень сжатия ≈ 11 . Однако дальнейшее увеличение этого значения ограничено возникновением детонации.

Двигатели с самовоспламенением работают при значениях степени сжатия $\approx 15 - 20$, что обеспечивает возгорание топлива. Уже при таких значениях степени сжатия значительно повышается максимальное давление и жесткость сгорания цикла. Это приводит к увеличению нагрузки на детали цилиндропоршневой группы и ужесточению требований к прочности конструкции двигателя, что, в свою очередь, вызывает рост механических потерь и увеличение массы двигателя. По этим причинам степень сжатия современных дизельных двигателей также ограничивается в районе 20.

Однако, не смотря на имеющиеся ограничения по степени сжатия для обоих типов поршневых двигателей, в настоящее время ведутся исследования возможности создания работоспособных двигателей со степенью сжатия более 25. Так, например, в работе [2] проведено численное исследование дизельного двигателя со степенью сжатия 30. Подвод теплоты здесь предлагается осуществить в начале процесса расширения. При этом

условия в камере сгорания во время впрыска должны обеспечить самовоспламенение не только дизельного топлива, но и бензина.

Таким образом, при создании перспективного высокоэффективного рабочего процесса выбор степени сжатия является принципиальным вопросом, требующим решения на самых ранних этапах реализации проекта.

Цель работы заключается в выявлении преимуществ реализации сверхвысоких степеней сжатия и определении оптимального диапазона степеней сжатия перспективного высокоэффективного рабочего процесса. Для достижения поставленной цели необходимо исследовать влияние степени сжатия на эффективные показатели двигателя.

Методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран четырехтактный одноцилиндровый дизельный двигатель YANMAR L-100C (степень сжатия в серийном исполнении составляет 19,3). Расчеты проводились в системе имитационного моделирования ДВС «Альбея», разработанной на кафедре ДВС Уфимского государственного авиационного технического университета. Эта система позволяет определить индикаторные и эффективные показатели двигателя в любой момент времени [3, 4, 5].

Для подтверждения адекватности модели были проведены расчеты параметров цикла и эффективных показателей двигателя YANMAR L-100C, которые были сопоставлены с данными экспериментального исследования и результатами индицирования. Условная продолжительность сгорания была определена из экспериментальных данных и составила 89 градусов угла п.к.в. Наилучшее совпадение расчётных и экспериментальных кривых давления и скорости нарастания давления в цилиндре было получено при значении показателя характера горения $m = 0,1$.

Из результатов сопоставления, представленных на рис. 1 и 2, видно, что используемая модель достаточно точно описывает исследуемый двигатель YANMAR L-100C.

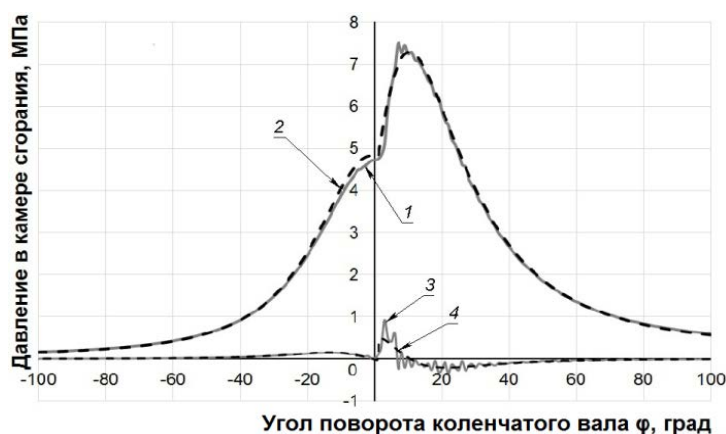


Рис. 1. Сопоставление расчётной и экспериментальной кривых давления и скорости нарастания давления ($dP/d\varphi$) в цилиндре двигателя YANMAR L-100C ($n = 3100$ об./мин., $\alpha = 1,36$):

1. Давление в цилиндре, эксперимент. 2. Давление в цилиндре, расчёт.
3. Скорость нарастания давления ($dP/d\varphi$), эксперимент.
4. Скорость нарастания давления ($dP/d\varphi$), расчёт.

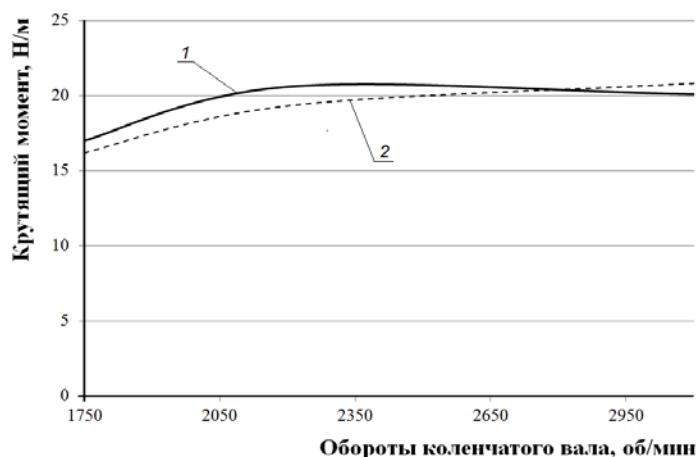


Рис. 2. Сопоставление расчётной и экспериментальной внешних скоростных характеристик двигателя YANMAR L-100C:

1. Эксперимент. 2. Расчёт.

Для оценки влияния степени сжатия на эффективные показатели двигателя, необходимо было корректно выбрать параметры характеристики выгорания. Показатель характера горения задавался двумя значениями: $m = 0,1$, соответствующее серийному исполнению двигателя, и $m = 3$, как наиболее типичное для бензиновых двигателей.

Условная продолжительность сгорания также задавалась значениями, характерными для современных бензиновых и дизельных двигателей (50 и 89 градусов угла поворота коленчатого вала (УПКВ) соответственно). Кроме того было дополнительно выбрано третье значение, соответствующее 30 градусам УПКВ. В традиционных двигателях сокращение продолжительности теплоподвода менее 40 – 50 градусов УПКВ вызывает сильный рост механической и тепловой нагрузки на двигатель [1], но в данном случае предполагалось, что при сверхвысоких степенях сжатия теплоподвод может начинаться после прохождения поршнем верхней мертвой точки. В таких условиях высокая скорость выгорания, а, соответственно и короткая условная продолжительность сгорания, будут благотворно влиять на эффективность рабочего процесса.

При расчётах зависимостей параметров исследуемого двигателя от степени сжатия угол начала теплоподвода выбирался из условия получения максимального эффективного КПД. Частота вращения коленчатого вала, используемая в расчетах, равна 3100 об/мин, что примерно соответствует режиму наибольшей эффективности.

Обсуждение результатов

На рис. 3 и 4 представлены расчетные зависимости эффективного КПД от степени сжатия исследуемого двигателя при показателе характера горения $m = 3$ и $0,1$ соответственно. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,36$.

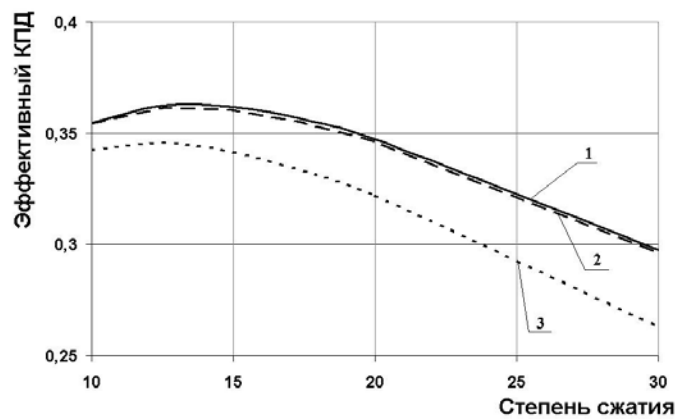


Рис. 3. Зависимость эффективного КПД от степени сжатия при показателе характера горения $m = 3$ и различных условных продолжительностях сгорания:
1. $\phi_z = 30$ град. УПКВ, 2. $\phi_z = 50$ град. УПКВ, 3. $\phi_z = 89$ град. УПКВ.

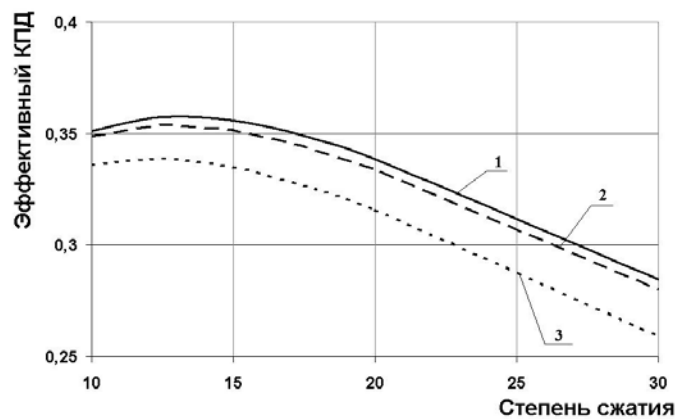


Рис. 4. Зависимость эффективного КПД от степени сжатия при показателе характера горения $m = 0.1$ и различных условных продолжительностях сгорания:
1. $\phi_z = 30$ град. УПКВ, 2. $\phi_z = 50$ град. УПКВ, 3. $\phi_z = 89$ град. УПКВ.

Во всех рассматриваемых условиях при переходе в диапазон сверхвысоких степеней сжатия (до значения 30) наблюдается снижение эффективного КПД цикла. Так, при повышении степени сжатия с 19,3 до 30 и значении показателя характера горения $m = 3$ эффективный КПД цикла падает на 14,3%, 14,4% и 18,3% для условной продолжительности сгорания $\phi_z = 30, 50$ и 89 градусов УПКВ соответственно. Для значения $m = 0,1$ падение эффективного КПД составляет 15,9%, 16,1% и 17,8% с тем же соответствием.

В то же время понижение степени сжатия исследуемого двигателя с 19,3 до 15 не вызывает понижения эффективного КПД цикла, а, напротив, ведет к его увеличению. Так при значении показателя характера горения $m = 3$ и $\phi_z = 30$ градусов УПКВ отмечается рост эффективного КПД цикла на 4,2%. При значениях условной продолжительности сгорания $\phi_z = 50$ и 89 градусов УПКВ рост составляет 4,1% и 6,1% соответственно. Аналогичная картина наблюдается и при значении показателя характера горения $m = 0,1$:

рост эффективного КПД цикла на 5,1%, 5,3% и 6,1% соответственно для $\phi_z = 30, 50$ и 89 градусов УПКВ.

В случае снижения степени сжатия с 19,3 до 12,5 и значения показателя характера горения $m = 3$ рост эффективного КПД составил 4,4%, 4,4% и 7,4% для $\phi_z = 30, 50$ и 89 градусов УПКВ соответственно. При значении $m = 0,1$ соответствующее повышение эффективного КПД составило 5,1%, 5,3% и 6,1%.

Необходимо ещё раз обратить внимание на то, что при проведении расчетов угол начала теплоподвода выбирался из условия получения максимального эффективного КПД. Значения угла начала теплоподвода представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Значения угла начала теплоподвода в расчетах зависимости эффективного КПД от степени сжатия исследуемого двигателя ($n = 3100$ об/мин, $\alpha = 1,36$), градус до ВМТ.

m	ϕ_z градусов УПКВ	Степень сжатия					
		10	12.5	15	17.5	20	30
3	30	8	6	6	5	4	2
	50	19	18	16	14	14	11
	90	43	40	37	36	34	30
0.1	30	3 после ВМТ	6 после ВМТ	7 после ВМТ	7 после ВМТ	8 после ВМТ	9 после ВМТ
	50	1	2 после ВМТ	3 после ВМТ	4 после ВМТ	5 после ВМТ	7 после ВМТ
	90	6	4	2	1	0	3 после ВМТ

Как следует из рис. 3 и 4, наибольшие значения эффективного КПД наблюдаются при показателе характера горения $m = 3$ и при значении условной продолжительности сгорания $\phi_z = 30$. Для режима с данными параметрами характеристики выгорания были проведены расчеты зависимости эффективного КПД от степени сжатия исследуемого двигателя при различных коэффициентах избытка воздуха (рис. 5).

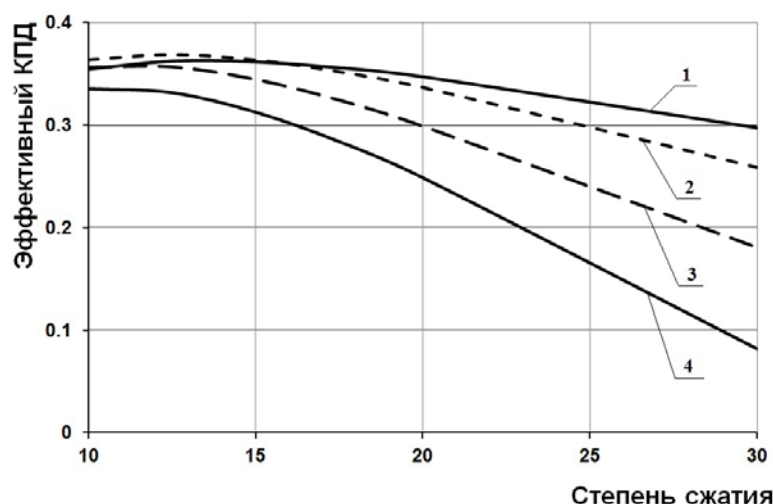


Рис. 5. Зависимость эффективного КПД от степени сжатия при различных коэффициентах избытка воздуха ($m = 3$, $\phi_z = 30$):

1. $\alpha = 1,36$. 2. $\alpha = 2$. 3. $\alpha = 3$. 4. $\alpha = 4$.

Точно так же, как и на полной нагрузке ($\alpha = 1,36$) на частичных нагрузках наблюдается падение эффективного КПД при повышении степени сжатия с 19,3 до 30. При этом с понижением нагрузки это падение усиливается: для $\alpha = 2$ снижение эффективного КПД составляет 23,1%, для $\alpha = 3$ – 39,5% и для $\alpha = 4$ – 67,1%.

На частичных нагрузках сохраняется тенденция увеличения эффективного КПД при снижении степени сжатия. При изменении степени сжатия с 19,3 на 15 эффективный КПД возрастает на 8%, 15,2% и 25,7% соответственно для $\alpha = 2$, $\alpha = 3$ и $\alpha = 4$. В случае изменении степени сжатия с 19,3 на 12,5 эффективный КПД возрастает на 9,5%, 19,4% и 33,3% соответственно для $\alpha = 2$, $\alpha = 3$ и $\alpha = 4$.

Падение эффективного КПД двигателя с повышением степени сжатия выше определенного значения может быть объяснено двумя основными причинами: увеличением механических потерь и увеличением отклонения от изохорного процесса подвода теплоты.

Увеличение механических потерь с ростом степени сжатия (рис. 6) является следствием повышения давления газов в цилиндре двигателя (рис. 7). При увеличении коэффициента избытка воздуха относительная доля механических потерь возрастает, соответственно снижается значение степени сжатия, соответствующее максимальному эффективному КПД.

Влияние отклонения от изохорного подвода теплоты на эффективный КПД двигателя описано в работе [6]. Сущность этого явления заключается в том, что с уменьшением объема камеры сгорания, а, следовательно, с увеличением степени сжатия, увеличивается изменение объема за единицу времени. Таким образом, при движении поршня вниз от верхней мертвой точки, у двигателя с высокой степенью сжатия объем рабочей камеры будет увеличиваться быстрее, чем у двигателя с низкой степенью сжатия. Как следствие, с повышением степени сжатия (при постоянной продолжительности теплоподвода) индикаторный КПД будет расти гораздо медленнее термического и, при определённых

условиях, даже снижаться (рис. 6). По этой же причине практически не увеличиваются максимальные значения температуры цикла (рис. 7).

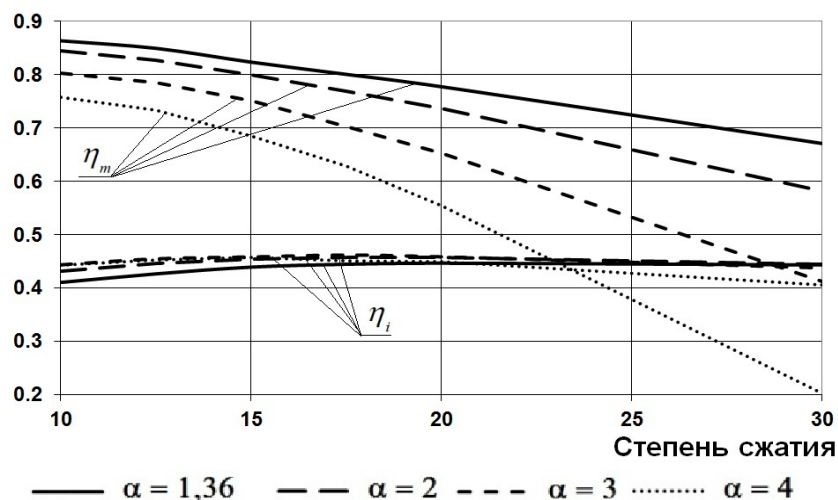


Рис. 6. Зависимость механического (η_m) и индикаторного (η_i) КПД от степени сжатия при различных коэффициентах избытка воздуха ($m = 3$, $\phi_z = 30$).

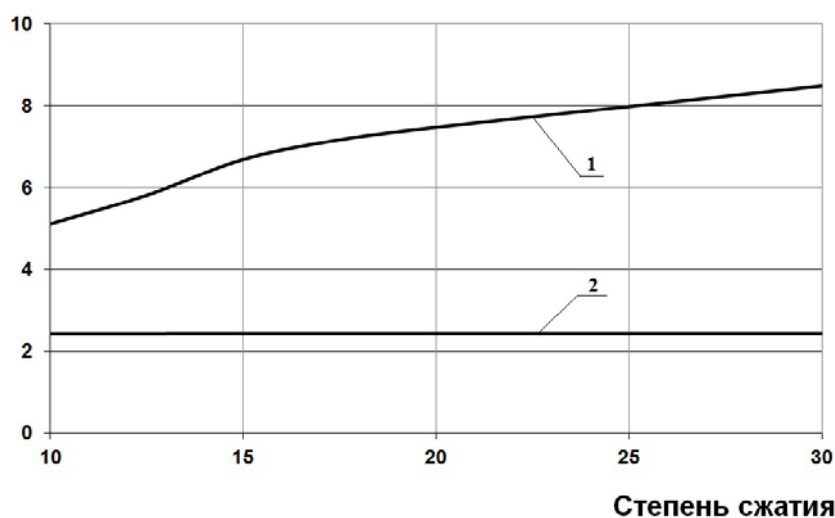


Рис. 7. Зависимости максимального давления и максимальной температуры цикла от степени сжатия при $\alpha = 1,36$ ($m = 3$, $\phi_z = 30$):

1. Максимальное давление, Мпа. 2. Максимальная температура, К/1000.

Выводы

Таким образом, в условиях исследуемого двигателя переход на сверхвысокие степени сжатия вызывает падение эффективного КПД как на полной нагрузке, так и на частичных режимах. В то же время понижение степени сжатия до значений 12 – 15 влечет рост эффективного КПД, значительно усиливающийся с понижением нагрузки. Учитывая, что транспортный двигатель эксплуатируется на частичных режимах (меньше половины максимальной мощности) до 50 - 70% общего времени, а на режимах холостого хода до

40% [7], можно сделать вывод, что снижение степени сжатия до значений 12 - 15 может привести к значительному повышению экономичности. При этом уровень нагрузок на элементы двигателя (рис. 7) может быть ощутимо понижен (до 30%).

Данный вывод подтверждается результатами, полученными в работе [7], где исследовался дизель со специальной системой зажигания с рядом последовательных искр. Было отмечено, что при снижении степени сжатия до 12, топливная экономичность дизеля возрастала.

Поддержка

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0316.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для втузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 372 с.
2. Ложкин М.Н., Коломиец П.В., Терехов А.П. Расчетная оценка рабочего цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с высокой степенью сжатия и подводом тепла в начале процесса расширения // Вектор науки ТГУ. 2011. № 2(16). С. 87-89.
3. Губайдуллин И.С. Моделирование рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания в интерактивной системе имитационного моделирования «Альбея». Уфа: УГАТУ, 1997. 43 с.
4. Загайко С.А. Моделирование механических потерь ДВС в системе имитационного моделирования «Альбея». Уфа: УГАТУ, 1996. 74 с.
5. Горбачев В.Г. Система имитационного моделирования «Альбея» (ядро). Руководство пользователя. Руководство программиста: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1995. 112 с.
6. Гарипов М.Д., Назмутдинова Г.Р., Сакулин Р.Ю. Расчетное исследование влияния степени сжатия на эффективные показатели дизельного двигателя // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 2. С. 138-141.
7. Phatak R.G., Komiyama K. Investigation of a spark- assisted diesel engine : SAE Technical Paper № 830588. 1983. 8 p. DOI: 10.4271/830588

Calculation of feasibility of super high compression in the piston internal combustion engine

09, September 2013

DOI: 10.7463/0913.0622287

Sakulin R.Yu., Ahtyamov I.I., Shayahmetov V.A., Yakovlev P.B.

Ufa State Aviation Technical University, Russia

laminar_burn@mail.ruilnar_u4aly@mail.ruvadyashayah@mail.ruyak21@live.ru

A feasibility of the four-stroke diesel engine YANMAR L-100C running under condition of the super-high compression ratio was investigated numerically in this paper. Computational model was created in the simulation modeling system “Albea” which was designed at the department of ICE of the Ufa State Aviation Technical University. Dependencies of brake efficiency on the different values of compression ratio of the investigated engine were calculated and presented in this work. It was discovered that growth of the compression ratio from 19.3 up to 30 led to the significant decrease in brake efficiency. In the meantime, decreasing of the compression ratio from 19.3 down to 12 – 15 led to the growth of brake efficiency, especially at partial loads.

Publications with keywords: [compression ratio](#), [piston ICE](#), [brakes efficiency](#), [the partial loads](#)**Publications with words:** [compression ratio](#), [piston ICE](#), [brakes efficiency](#), [the partial loads](#)

References

1. Orlin A.S., Kruglov M.G., Vyubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion engines. The theory of piston and composite engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 372 p.
2. Lozhkin M.N., Kolomiets P.V., Terekhov A.P. Raschetnaya otsenka rabocheho tsikla porshnevoogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya s vysokoy stepen'yu szhatiya i podvodom tepla v nachale protsessa rasshireniya [Calculation of the piston of internal combustion engine with high compression and heat supply in the beginning expansion stroke]. *Vektor nauki TGU* [Vector of the science of Togliatti SU], 2011, no. 2(16), pp. 87-89.
3. Gubaydullin I.S. *Modelirovanie rabochikh protsessov dvigateley vnutrennego sgoraniya v interaktivnoy sisteme imitatsionnogo modelirovaniya “Al'beya”* [Modeling of the operation

- processes of internal combustion engines in an interactive simulation system “Albeya”]. Ufa, USATU Publ., 1997. 43 p.
4. Zagayko S.A. *Modelirovanie mekhanicheskikh poter' DVS v sisteme imitatsionnogo modelirovaniya “Al'beya”* [Simulation of mechanical losses of ICE in the simulation system “Albeya”]. Ufa, USATU Publ., 1996. 74 p.
5. Gorbachev V.G. *Sistema imitatsionnogo modelirovaniya “Al'beya” (yadro). Rukovodstvo pol'zovatelya. Rukovodstvo programmista* [Simulation system “Albeya” (core). User's guide. Programmer's guide]. Ufa, USATU Publ., 1995. 112 p.
6. Garipov M.D., Nazmutdinova G.R., Sakulin R.Yu. Raschetnoe issledovanie vliyaniya stepeni szhatiya na effektivnye pokazateli dizel'nogo dvigatelya [Numerical simulation of the influence of compression on the diesel engine brake efficiency]. *Vestnik UGATU* [Herald of USATU], 2012, vol. 16, no. 2, pp. 138-141.
7. Phatak R.G., Komiyama K. *Investigation of a spark- assisted diesel engine*. SAE Technical Paper no. 830588, 1983. 8 p. DOI: 10.4271/830588