

УДК 621.431

**Канд. техн. наук Д. С. Минчев, канд. техн. наук А. В. Нагорный***Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ С ПЕРЕМЕННЫМ ШАГОМ ПО ВРЕМЕНИ ПРИ СИНТЕЗЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВС

*Рассмотрены вопросы использования расчетной сетки переменного шага по времени при моделировании рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания в рамках квазистационарной математической модели. Существенное ускорение скорости расчетов может быть достигнуто путем использования местного сгущения расчетной сетки в определенном диапазоне углов поворота коленчатого вала на участках впрыска топлива, сгорания, свободного выпуска и перекрытия клапанов. Предложена методика выбора рациональной разбивки расчетной сетки по времени для получения наилучшего сочетания скорости и точности расчетов.*

**Ключевые слова:** переменный шаг по времени, расчетная сетка, моделирование рабочего цикла, двигатель внутреннего сгорания.

### Постановка проблемы

Синтез рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания, выполняемый с помощью математического моделирования, применяется при решении подавляющего большинства задач, связанных с проектированием и доводкой двигателя и его систем. Развитые программные продукты, такие как KIVA, Ricardo VECTIS, AVL FIRE позволяют выполнять замкнутое моделирование рабочего процесса двигателя на основе решения трехмерных задач вычислительной газодинамики (CFD). Такой подход обеспечивает выполнение тонких исследований рабочих процессов в двигателях с учетом максимального числа влияющих факторов. Недостатками указанных программных пакетов являются высокие требования к вычислительной мощности компьютера, необходимость задания больших массивов исходных данных, длительность расчета (в ряде случаев измеряемая тысячами часов), сложность выполнения многопараметрических исследований, трудности при проверке адекватности моделирования. Как следствие, продолжается совершенствование более простых нульмерных (0D) и одномерных (1D) математических моделей, несомненным достоинством которых является высокая скорость расчетов. Такие математические модели в частности используются при проектировании микропроцессорных систем управления двигателем, в системах диагностики рабочего процесса и др. Следует отметить, что для решения подобных задач часто ставится условие быстрого времени расчета вплоть до моделирования «в реальном времени», что свидетельствует о безусловной актуальности мероприятий, направленных на повышение скорости расчетов [2].

### Обзор существующих методов решения проблемы

В термодинамических математических моделях рабочего процесса, выполненных с использованием 3D подхода, выполняется численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, описывающих состояние рабочего тела во взаимосвязанных открытых термодинамических системах (ОТС), на которые разбивается двигатель. Время выполнения расчетов лимитируется следующими факторами: 1) временем выполнения внутреннего цикла перебора по углу коленчатого вала; 2) временем выполнения внешнего цикла достижения идентичности начальных и конечных параметров рабочего тела во всех ОТС; 3) временем сведения параметров в системе газотурбинного наддува (определение частоты вращения турбокомпрессора и давления наддувочного воздуха). Также значимым является вопрос выбора между расчетом рабочего процесса индивидуально для каждого рабочего цилиндра двигателя или использованием подхода «осредненного» цилиндра. В последнем случае скорость расчетов существенно возрастает. Необходимо отметить важность ускорения выполнения расчетов на внутреннем цикле, так как он многократно повторяется во внешних циклах подбора параметров. Скорость выполнения внутреннего цикла зависит от способа разбивки расчетной сетки по времени (углу поворота коленчатого вала, п.к.в.) и от выбранного численного метода. Чем меньше шаг расчета по времени, тем больше вычислительных операций необходимо выполнить во внутреннем цикле и тем выше требования к оперативной памяти ЭВМ, так как объем массивов данных, в которых заносятся параметры ра-

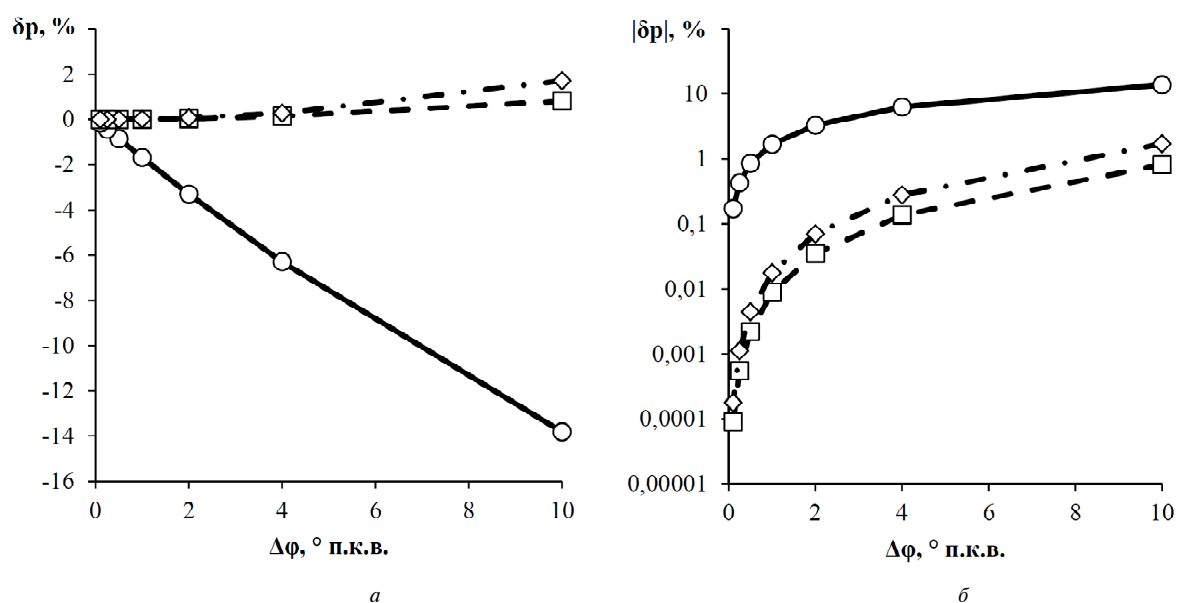
бочего тела, пропорционален числу расчетных точек. Известно, что для всех численных методов наблюдается снижение точности расчета с увеличением расчетного шага. Простой метод Эйлера позволяет получить решение при минимуме вычислений, но его точность резко уменьшается с увеличением шага расчета. Более точные результаты обеспечивают различные вариации метода Рунге-Кутты, разностные методы решения интегральных систем уравнений [3]. Их реализация приводит к увеличению вычислительных операций по сравнению с простым методом Эйлера, в ряде случаев весьма заметному. Одним из очевидных способов увеличения скорости расчетов является использование неравномерной разбивки расчетной сетки по углу п.к.в. [1, 4, 5]. В этом случае некоторые участки рабочего процесса, такие как впрыск и сгорание топлива, газообмен во время перекрытия клапанов, могут рассчитываться с более мелким шагом по времени. Таким образом, достигается уменьшение количества расчетных точек и, соответственно, размеров массивов данных и объемы производимых вычислений. В то же время неравномерная разбивка расчетной сетки по углу поворота коленчатого вала может приводить к дополнительным погрешностям расчета, что требует проведения дополнительных исследований.

**Цель работы.** Изучение влияния способа разбивки расчетной сетки по углу поворота коленчатого вала на точность и скорость синтеза рабо-

чего процесса двигателей внутреннего сгорания, получение рекомендаций о рациональном способе разбивки расчетной сетки.

### Основная часть

Определение погрешности численного интегрирования при синтезе рабочего процесса ДВС затрудняется тем, что отсутствует точное решение задачи. Поэтому используются так называемые тестовые задачи, в частности задача об адиабатном сжатии идеального газа в поршневом компрессоре. Так на рис. 1. приведены относительные погрешности расчета давления конца процесса сжатия в поршневом компрессоре с диаметром цилиндра  $D = 12$  см, ходом поршня  $S = 12$  см и степенью сжатия  $\varepsilon = 16,5$ . Рабочее тело – идеальный газ с постоянной теплоемкостью, показателем адиабаты  $k = 1,4$ , молярной массой  $\mu = 29$  г/моль. Как видно, простой метод Эйлера характеризуется очень быстрым возрастанием погрешности с увеличением расчетного шага, что делает его малоприменимым для практических расчетов. При этом для всех численных методов соблюдается зависимость – чем меньше шаг расчета, тем выше точность. Из рассмотренных методов наилучшие результаты демонстрирует неявный метод Рунге-Кутты второго порядка, или метод предиктор-корректор, который в отличие от явного метода Рунге-Кутты 4-го порядка требует в два раза меньше вычислений при более высокой точности [7].



**Рис. 1.** Погрешности численных методов при решении тестовой задачи адиабатного сжатия воздуха: —○— простой метод Эйлера, —□— метод Рунге-Кутты четвертого порядка, —◇— неявный метод Рунге-Кутты второго порядка:

$a$  – абсолютная шкала;  $b$  – логарифмическая шкала, модули погрешностей

Имплементация неявного метода Рунге-Кутты второго порядка к развернутой математической модели требует существенной ревизии алгоритмов расчета. Необходимо выделить набор уточняемых на шаге «корректор» параметров (более десятка), значение которых в зависимости от стадии расчетного метода равно либо текущему значению для данного временного слоя, либо сумме текущего значения и значения для следующего временного слоя, полученного на шаге «предиктор». Отсутствие жесткой связи между шагом расчета  $i$  и углом поворота коленчатого вала  $\varphi^i$  требует введения соответствующих массивов и предварительного определения координаты  $i$  для ряда характерных значений углов п.к.в., таких как фазы газораспределения, моменты начала и окончания подачи топлива, сгорания и т. п. Однако наибольшие трудности вызывает совмещение расчетных сеток для различных ОТС. В частности типичной задачей является определение параметров в ОТС «Ресивер» и ОТС «Выпускной коллектор», объединяющих несколько цилиндров. Вследствие смещения работы цилиндров на угол заклинки кривошипов коленчатого вала, текущий шаг расчета для каждого из цилиндров будет различным, что делает невозможным их стыковку с ОТС, которая одновременно взаимодействует с несколькими цилиндрами. Применительно к случаю, когда отдельно моделируется рабочий процесс в каждом цилиндре, данное обстоятельство потребует дополнительного уплотнения расчетной сетки для ОТС «Ресивер» и ОТС «Выпускной коллектор» на соответствующих участках, что при достаточно большом количестве цилиндров (4 и более) приводит к сплошному мелкому шагу расчета для данных ОТС. Тем не менее, затруднения при стыковке останутся, так как в общем случае эти шаги могут быть различными. Для преодоления этих трудностей используются специальные алгоритмы, изложенные в [7].

Увеличение расчетного шага по углу п.к.в. позволит существенно сократить количество вычислений и повысить скорость расчетов. Компенсация возможного снижения точности результатов достигается применением эффективного численного метода и местного сгущения расчетной сетки на тех участках рабочего процесса, где это необходимо. Такими участками логично назначить процессы впрыска топлива, смесеобразования и сгорания, а также процессы газообмена в период перекрытия клапанов.

На рис. 2, 3 и в таблице 1 представлены результаты численного синтеза рабочего процесса дизельного двигателя типа 8ЧН 12/12 при одинаковых исходных данных, неизменной настройке математической модели и различном способе

разбивки расчетной сетки по углу п.к.в. Исследовался стационарный режим работы двигателя при частоте вращения коленчатого вала  $n = 1599 \text{ мин}^{-1}$  и цикловой подаче топлива  $q_f = 0,042 \text{ г}$ .

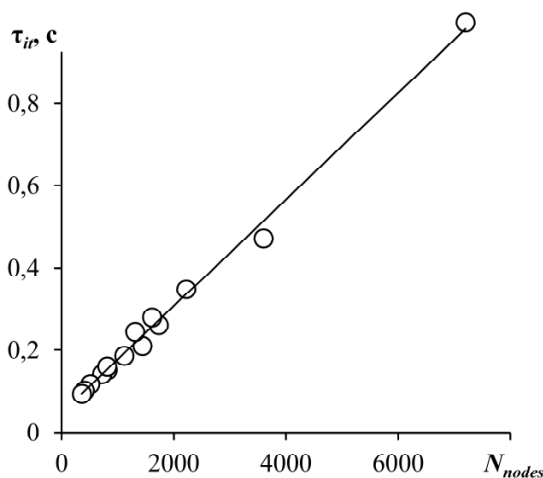


Рис. 2. Зависимость среднего времени вычисления одной внутренней итерации от числа узлов расчетной сетки по времени

Были использованы следующие варианты разбивки расчетной сетки: с постоянным шагом  $\Delta\varphi_{base} = 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 2,0$  град. п.к.в., и с местным сгущением расчетной сетки на участках впрыска-испарения-сгорания топлива и на участке перекрытия клапанов  $\Delta\varphi_{overlap} \Delta\varphi_{comb} = 0,1, 0,2, 0,5, 1,0$ .

В качестве эталонных результатов приняты результаты синтеза рабочего процесса при постоянном шаге расчетной сетки  $\Delta\varphi_{base} = 0,1$  град п.к.в. Для настройки математической модели широко использованы экспериментальные данные по исследуемому двигателю типа 8ЧН 12/12, полученные в лаборатории ДВС НУК [6].

Расчеты выполнялись удаленно. Сервер, на котором размещается расчетное ядро программы, имеет следующие характеристики: процессор Intel Core i5, 3000 GHz, оперативная память 8GB DDR3 867GHz.

Из рис. 2 видно, что зависимость среднего времени выполнения одной внутренней итерации линейно зависит от числа расчетных точек на временной сетке  $N_{nodes}$ . При этом суммарное число итераций мало зависит от способа разбивки расчетной сетки. С увеличением шага разбивки сетки  $\Delta\varphi_{base}$  возрастает отклонение значений контролируемых параметров от эталонных, при этом применение местного сгущения позволяет существенно уменьшить это отклонение. В каче-

стве контролируемых параметров выбраны: коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , степень повышения давления воздуха в компрессоре турбокомпрессора  $\Pi_{comp}$ , максимальное давление  $p_{max}$  и температура  $t_{max}$  в цилиндре, температура отходящих газов перед турбиной  $t_t$ , механический и индикаторный к.п.д. двигателя  $\eta_m$  и  $\eta_i$  соответственно, суммарный к.п.д. турбокомпрессора  $\eta_{TC}$  и удельный эффективный расход топлива  $g_e$ .

Выделим следующие ключевые моменты, оказывающие влияние на значение контролируемых параметров:

1) итоговое количество свежего заряда в ци-

линдре в момент закрытия впускных клапанов, определяемое по результатам расчета газообмена;

2) изменение параметров рабочего тела в цилиндре во время процесса сгорания, определяемое по результатам расчета характеристик тепловыделения (используется метод Разлейцева Н. Ф.);

3) погрешность численного интегрирования;

4) величина средней частоты вращения ротора турбокомпрессора, при которой обеспечивается баланс мощностей турбины и компрессора.

**Таблица 1** – Сводная таблица результатов численного синтеза рабочего процесса двигателя типа 8ЧН 12/12,  $n = 1599 \text{ мин}^{-1}$ ,  $q_f = 0,042 \text{ г}$

Парам.	Ед. изм.	Значение														
		0,1	0,2	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	2	2	2	2	2	
$\Delta\varphi_{base}$	° п.к.в.	0,1	0,2	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	2	2	2	2	2	
$\Delta\varphi_{overlap}$	° п.к.в.	0,1	0,2	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5	1	0,1	0,2	0,5	1	2	
$\Delta\varphi_{comb}$	° п.к.в.	0,1	0,2	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5	1	0,1	0,2	0,5	1	2	
$N_{nodes}$	-	7200	3600	2220	1732	1440	1612	1117	820	720	1311	811	511	411	360	
$\delta\rho_{cyl}$	%	0,007	0,015	0,004	0,016	0,014	0,027	0,006	0,005	0,040	0,019	0,009	0,009	0,013	0,006	
$\delta\rho_{res}$	%	0,012	0,014	0,005	0,008	0,013	0,033	0,005	0,005	0,038	0,043	0,009	0,028	0,038	0,005	
$\delta\rho_{exh}$	%	0,005	0,014	0,004	0,015	0,012	0,009	0,005	0,002	0,034	0,027	0,008	0,010	0,013	0,016	
$\delta P_{TC}$	%	0,015	0,033	0,027	-0,010	0,044	0,035	-0,044	-0,005	-0,030	0,008	-0,015	-0,022	-0,035	-0,036	
$\delta\Pi_{comp}$	%	0,034	0,039	0,040	0,044	0,045	0,026	0,044	0,011	0,034	0,046	0,047	0,044	0,022	0,040	
$N_{it}$	-	293	311	360	307	323	281	308	320	391	212	267	297	365	349	
$\tau_{\Sigma}$	с	292,04	146,81	125,072	79,887	67,794	78,373	57,261	48,646	55,38	51,713	42,749	34,873	37,231	32,71	
$\tau_{it}$	с	0,997	0,472	0,347	0,260	0,210	0,279	0,186	0,152	0,142	0,244	0,160	0,117	0,102	0,094	
$\Pi_{comp}$	-	1,5700	1,5721	1,5703	1,5726	1,5748	1,5676	1,5724	1,5747	1,5864	1,5625	1,5695	1,5758	1,5849	1,6007	
$\alpha$	-	3,306	3,310	3,305	3,306	3,310	3,298	3,300	3,302	3,325	3,286	3,281	3,287	3,314	3,336	
$\eta_i$	%	45,49	45,45	45,46	45,43	45,62	45,44	45,40	45,60	45,36	45,30	45,29	45,48	45,32	45,50	
$\eta_m$	%	64,82	64,77	64,82	64,77	64,87	64,82	64,80	64,91	64,61	64,72	64,80	64,92	64,61	64,45	
$b_b$	г/(кВт·ч)	284,0	284,4	284,1	284,5	282,9	284,3	284,6	282,9	285,7	285,6	285,2	283,6	285,9	285,5	
$P_b$	кВт	56,80	56,72	56,77	56,69	57,02	56,74	56,68	57,02	56,46	56,48	56,55	56,88	56,42	56,50	
$p_{max}$	кПа	6676,2	6663,7	6678,4	6662,6	6612,3	6670,5	6656,9	6603,0	6492,6	6659,4	6614,4	6562,8	6493,8	6485,1	
$t_{max}$	°С	1056,2	1052,0	1056,3	1052,5	1051,3	1057,3	1053,4	1052,7	1030,6	1059,1	1056,9	1055,1	1032,5	1009,5	
$t_t$	°С	430,1	429,2	430,4	429,7	425,3	431,0	430,3	426,2	422,5	432,4	432,2	427,8	422,9	411,6	
$\eta_{comp.ad}$	%	67,63	67,60	67,64	67,60	67,57	67,44	67,63	67,59	67,42	66,81	67,39	67,62	67,45	67,39	
$\eta_{e,t}$	%	53,30	53,30	53,31	53,30	53,25	53,28	53,31	53,27	53,20	53,22	53,24	53,24	53,17	52,92	
$\eta_{tc}$	%	36,05	36,03	36,06	36,03	35,98	35,93	36,05	36,01	35,87	35,56	35,88	36,00	35,86	35,67	
$\delta_{\Sigma}$	%	0,00	0,34	0,12	0,33	1,55	0,39	0,44	1,50	3,39	1,24	1,45	1,88	3,32	5,30	

Для общей оценки отклонения результатов расчета при применении иных способов разбивки расчетной сетки предлагается использовать стандартное отклонение значений контролируемых параметров от эталонных:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_i^3)^2}{N}}$$

где  $N$  – число контролируемых параметров,  $x_i, x_i^9$  – значение  $i$ -го контролируемого параметра для данного способа разбивки расчетной сетки и эталонного соответственно.

На рис. 4 представлены графические зависимости, на основании обработки которых можно делать обоснованный выбор способа разбивки расчетной сетки.

Окончательный выбор рационального способа разбивки расчетной сетки должен выполняться

с учетом анализа расчетных диаграмм протекания рабочего процесса.

На рис. 5 показано совмещение диаграмм впрыска топлива  $d\sigma/d\varphi$ , скорости тепловыделения  $dx/d\varphi$  и давления в цилиндре  $p$  при различном постоянном шаге разбивки расчетной сетки  $\Delta\varphi_{base}$ .

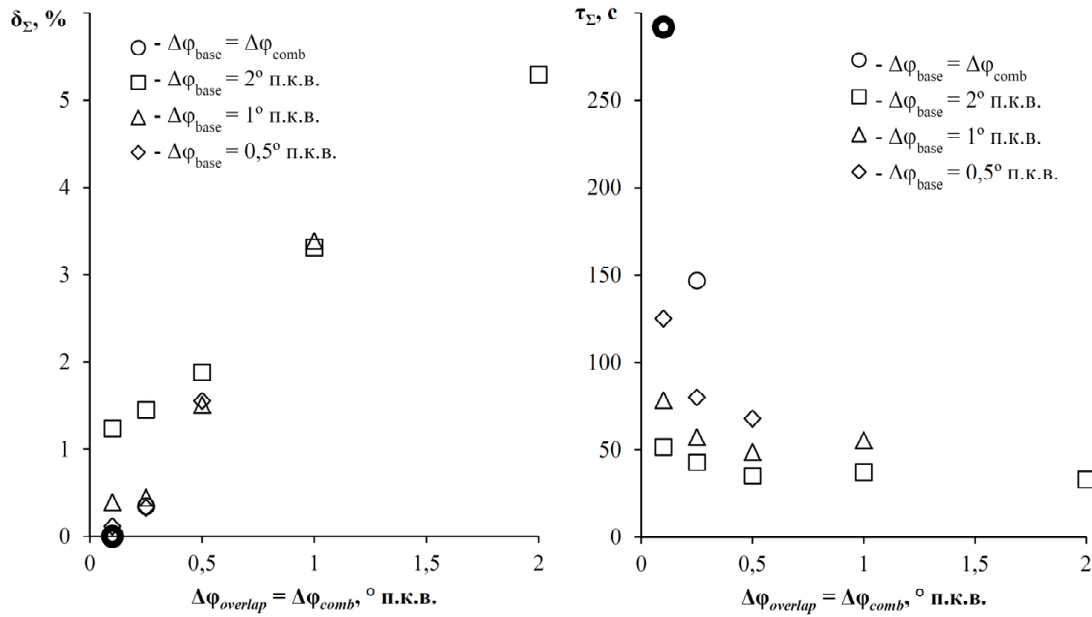


Рис. 3. Влияние способа разбивки расчетной сетки по углу п.к.в. на стандартное отклонение контрольных параметров и суммарное время выполнения расчета

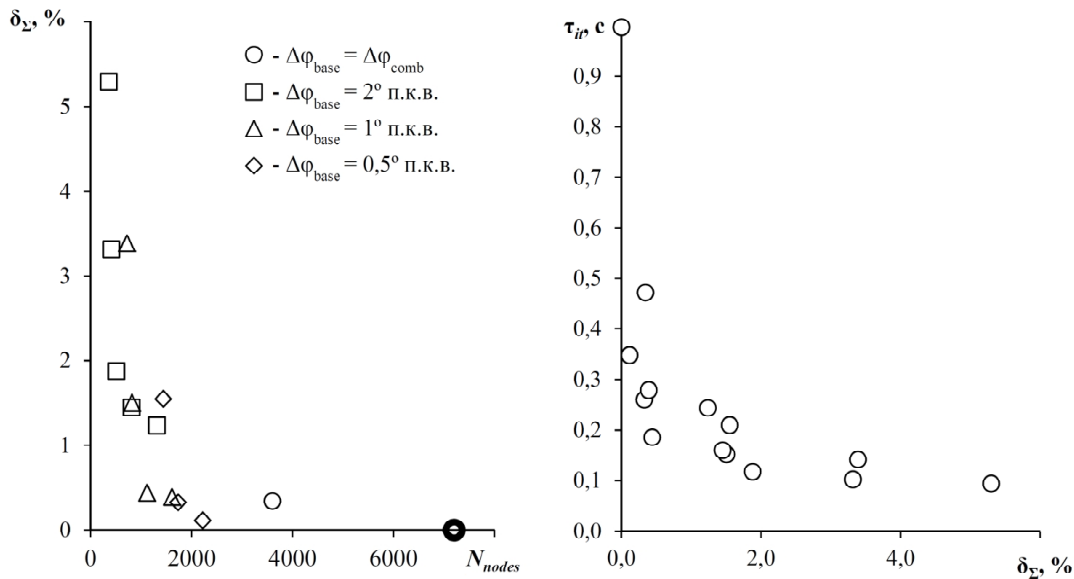


Рис. 4. Зависимость стандартного отклонения контролируемых параметров от числа узлов расчетной сетки и его связь со значением среднего времени одной итерации

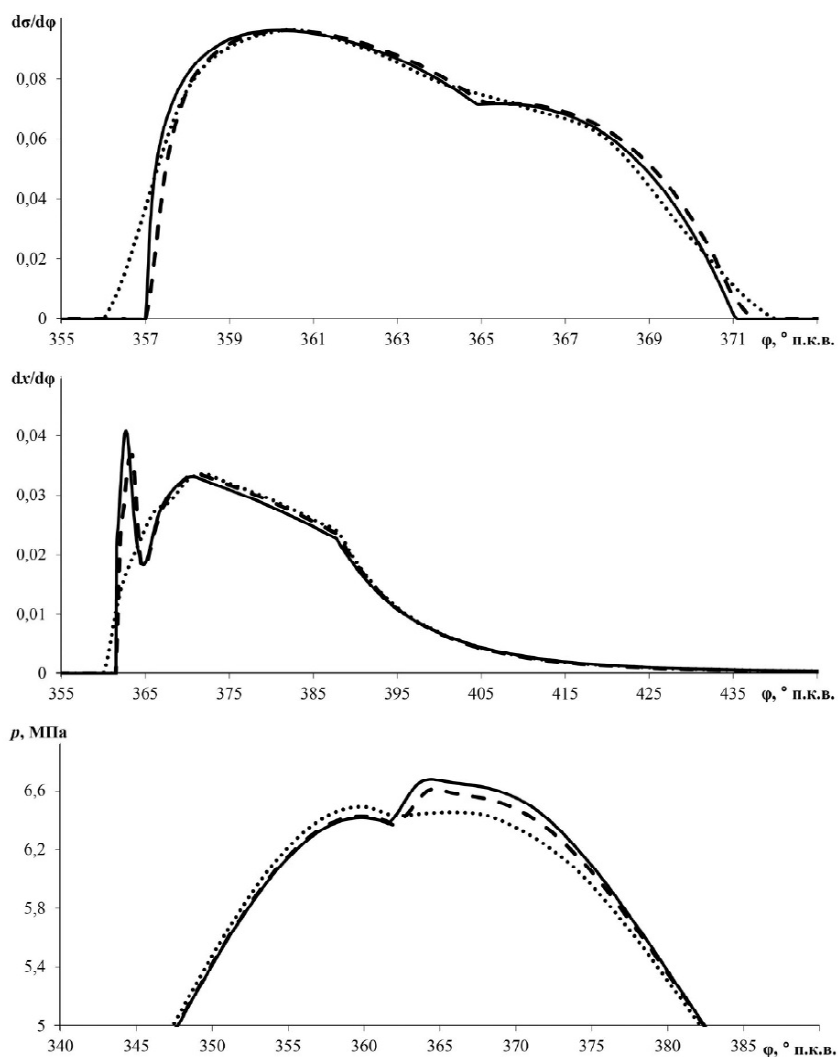


Рис. 5. Влияние шага разбивки расчетной сетки на моделирование процесса сгорания:

----  $\Delta\varphi_{\text{base}} = 0,1^\circ$  п.к.в., - - - =  $0,5^\circ$  п.к.в., — =  $2^\circ$  п.к.в.

Как видно, при увеличении расчетного шага наблюдается существенная деформация синтезируемой индикаторной диаграммы на участке процесса сгорания, которая в первую очередь обусловлена изменением формы расчетных характеристик тепловыделения. Так, при шаге расчета

$\Delta\varphi_{\text{base}} = 2^\circ$  п.к.в. на характеристике тепловыделения отсутствует первый пик тепловыделения кинетической фазы сгорания и эффект ослабления интенсивности сгорания, вследствие взаимодействия факелов со стенками камеры сгорания. Искажение расчетных характеристик тепловыделения, помимо прочего, также связано с более грубым описанием характеристик впрыска топлива при крупном шаге расчета.

Применение местного сгущения расчетной сетки позволяет добиться практически полного

совпадения расчетных характеристик тепловыделения с характеристиками, полученными для сплошного шага расчета.

Подводя итог, для рассматриваемого случая рациональным следует признать выбор следующих расчетных шагов:  $\Delta\varphi_{\text{base}} = 1^\circ$  п.к.в.,

$\Delta\varphi_{\text{comb}} = 0,1^\circ$  п.к.в.,  $\Delta\varphi_{\text{overlap}} = 0,2^\circ$  п.к.в. При этом будет обеспечена высокая точность расчетов, сопоставимая с таковой для расчета с использованием сетки постоянного шага  $\Delta\varphi_{\text{base}} = 0,1^\circ$  п.к.в., при повышении скорости выполнения расчетов практически в 5 раз (число узлов расчетной сетки снижается с 7200 до 1292).

Безусловно, указанные рекомендации не являются универсальными. В частности при расче-

те процесса сгорания по методу Вибе для двигателей с искровым зажиганием шаг сгущения расчетной сетки можно без ущерба для точности расчета увеличить до  $\Delta\varphi_{\text{comb}} = 0,5^\circ$  п.к.в. В то же время для двигателей с большим значением перекрытия клапанов может потребоваться уменьшение шага сгущения расчетной сетки  $\Delta\varphi_{\text{overlap}}$ .

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Использование расчетной сетки с переменным шагом по углу п.к.в. совместно с эффективными численными методами интегрирования систем дифференциальных уравнений, описывающих протекание рабочего процесса в цилиндре ДВС и его газоздушном тракте, позволяет существенно сократить время расчета при минимальных потерях в точности. В сочетании с гипотезой об осредненном цилиндре такой подход позволяет обеспечить максимально высокую скорость расчетов, что необходимо при создании онлайн приложений и для обеспечения моделирования процессов в реальном времени. Для получения наилучших результатов при моделировании рабочего процесса дизельного двигателя со свободным газотурбинным наддувом и однофазным впрыске топлива можно рекомендовать следующие расчетные шаги:  $\Delta\varphi_{\text{base}} = 1^\circ$  п.к.в.,  $\Delta\varphi_{\text{comb}} = 0,1^\circ$  п.к.в.,  $\Delta\varphi_{\text{overlap}} = 0,2^\circ$  п.к.в.

#### Список литературы

1. Development and validation of a “crank-angle” model of an automotive turbocharged Engine for HiL Applications / P. Casoli, A. Gambarotta, N. Pompini and etc. // Published by Elsevier Ltd. – Energy Procedia 45(2014). – P. 839–848.
2. Chan KinYip. Comparison of Engine Simulation Software for Development of Control System / KinYip Chan, A. Ordys, K. Volkov, O. Duran // Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering. – Vol. 2013, Article ID 401643 – 21 p.
3. Кулешов А. С. Развитие методов расчета и оптимизации рабочих процессов ДВС : дисс. д.т.н. / А. С. Кулешов. – М., МГТУ, 2011. – 235 с.
4. Крушедольський О. Г. Моделювання робочих процесів транспортних дизелів на експлуатаційних режимах / О. Г. Крушедольський – Х.: УкрДАЗДТ, 2007. – 217 с
5. Турбонаддув высокооборотных дизелей / А. Э. Симсон, В. Н. Каминский, Ю. Б. Моргулис и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
6. Нагорный А. В. Повышение эффективности форсированных высокооборотных дизельных двигателей использованием систем управляемого двухступенчатого наддува : дисс. к.т.н. / А. В. Нагорный. – Николаев, НУК, 2014. – 247 с.
7. Минчев Д. С. Выбор численного метода для синтеза рабочего процесса ДВС / Д. С. Минчев, А. В. Нагорный // Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції – Миколаїв: НУК, 2016 – 5 с.

Поступила в редакцию 11.05.2017

#### Минчев Д. С., Нагорный А. В. Використання розрахункової сітки змінного кроку за часом для синтезу робочого процесу ДВЗ

*Розглянуті питання використання розрахункової сітки змінного кроку за часом при моделюванні робочого циклу двигунів внутрішнього згорання в рамках квазістаціонарної математичної моделі. Значне прискорення швидкості розрахунку може бути досягнуте використанням місцевого ущільнення розрахункової сітки в певному діапазоні кутів повороту колінчастого валу на ділянках вприскування палива, згорання, вільного випуску та перекриття клапанів. Запропоновано методику вибору раціональної розбивки розрахункової сітки за часом для отримання найкращого поєднання швидкості та точності розрахунків.*

**Ключові слова:** змінний крок за часом, розрахункова сітка, моделювання робочого циклу, двигун внутрішнього згорання.

#### Minchev D., Nahirnyi A. Application of the computational mesh with variable time step for ICE operating cycle synthesis

*Application of the variable time step computational mesh for 0-D internal combustion engine operating cycle synthesis is considered. The significant acceleration of the computational speed is achieved by using local deep resolution mesh at the ranges of crank angle degrees for fuel-injection, combustion processes and for gas exchange processes (free exhaust and overlapping phase) as it is shown. The approach for choosing the reasonable distribution of the computational mesh resolution over entire operating cycle is also presented.*

**Key words:** variable time step, computational mesh, operating cycle simulation, internal combustion engine.