

Т.Н. Колесникова, В.Г. Заренбин, О.П. Сакно

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СУММАРНОГО КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ЦИЛИНДРОВ

Рассмотрено одно из актуальных направлений повышения топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов, а именно, отключение цилиндров двигателей внутреннего сгорания на режимах холостого хода и частичных нагрузок. Существующие на сегодня ДВС с отключением цилиндров располагают достаточными техническими решениями, обеспечивающими высокие топливно-экономические и экологические показатели рабочего процесса двигателя. Наряду с этим такие двигатели требуют решения следующих задач: улучшение массогабаритных показателей, снижение стоимости и упрощение конструкции, повышение надежности и тому подобное. К основным задачам транспортных средств относится также снижение уровня вибрации двигателя. Эта задача особенно актуальна для ДВС с отключением цилиндров. При отключении цилиндров растет неравномерность суммарного крутящего момента от рабочих процессов в активных цилиндрах и, как следствие, неравномерность хода двигателя, которая влияет на динамические характеристики автомобиля в целом. Для решения этой задачи были рассмотрены общие положения неравномерности крутящего момента двигателей внутреннего сгорания. Были обработаны суммарные крутящие моменты различных двигателей и получены данные о неравномерности крутящих моментов. Разработана методика исследования влияния отключения цилиндров, в частности числа активных цилиндров, на неравномерность суммарного крутящего момента. Введено понятие степени изменения неравномерности крутящего момента двигателя с отключением цилиндров и предложено уравнение для его определения в зависимости от числа активных цилиндров. Также введено понятие степени изменения коэффициента неравномерности крутящего момента двигателя при отключении цилиндров. Выполнен пример расчета четырехцилиндрового четырехтактного рядного двигателя для возможности сравнения изменения неравномерности крутящего момента при отключении цилиндров в данном двигателе. В результате выполненных расчетов было установлено, что коэффициент неравномерности крутящего момента при работе двигателя на 3-х, 2-х и 1-м цилиндрах в среднем возрастает соответственно в 1,5; 2 и 3 раза. Проанализированы результаты расчетов и приведены гистограммы при всех возможных значениях числа активных цилиндров.

Ключевые слова: отключение цилиндров; бензиновый двигатель; топливная экономичность; методика; суммарный крутящий момент; неравномерность; коэффициент; степень; гистограмма; силы давления газов.

Введение

Отключение цилиндров двигателей внутреннего сгорания на режимах холостого хода и частичных нагрузок является одним из актуальных направлений повышения топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов.

Существующие на сегодня ДВС с отключением цилиндров располагают достаточными техническими решениями, обеспечивающими высокие топливно-экономические и экологические показатели рабочего процесса двигателя. Наряду с этим такие двигатели требуют решения следующих задач: улучшение массогабаритных показателей, снижение стоимости и упрощение конструкции, повышение надежности и тому подобное.

К основным задачам транспортных средств относятся также снижение уровня вибрации двигателя. Эта задача особенно актуальна для ДВС с отключением цилиндров. При отключении цилиндров растет неравномерность суммарного крутящего момента от рабочих процессов в активных цилиндрах и, как следствие, неравномерность хода двигателя, которая влияет на динамические характеристики автомобиля в целом.

Для решения этой задачи необходимо проведение исследований влияния неравномерности кру-

тящего момента поршневого ДВС с отключением цилиндров на режимах частичных нагрузок на равномерность хода двигателя.

Общие положения

В реальном двигателе вследствие изменения величины суммарного крутящего момента угловая скорость вращения коленчатого вала не является постоянной. Эта скорость колеблется в течение одного цикла и влияет в первую очередь на равномерность хода двигателя.

В литературе [1] приведены графики крутящих моментов традиционных четырехтактных двигателей с рядным расположением цилиндров. Здесь приняты одинаковыми для всех двигателей: диаметр и ход поршня; массы возвратно-поступательно движущихся деталей, связанных с поршнем, а также массы вращающихся частей, приведенных к радиусу кривошипа. При этом графики крутящих моментов были построены для одного номинального режима работы всех цилиндров.

При отключении цилиндров в двигателе появляется возбуждающий фактор - суммарный крутящий момент, создаваемый активными цилиндрами [3]. Этот момент по величине и характеру изменения по углу поворота коленчатого вала существен-

но отличается от суммарного момента двигателя со всеми работающими цилиндрами (без отключения цилиндров). По мере снижения нагрузки двигателя число активных цилиндров уменьшается, что приводит к нарушению чередование вспышек и снижению частоты возбуждения, которая негативно влияет на равномерность хода двигателя и комфортабельность автомобиля в целом [4].

В настоящее время фирмы-производители двигателей для более равномерного чередования активных цилиндров рекомендуют отключать цилиндры следующим образом: в четырехцилиндровом двигателе - два цилиндра; шестицилиндровом от одного до трех, а в восьмицилиндровом - два или четыре [2]. Для оценки неравномерности крутящего момента традиционного двигателя обычно пользуются двумя коэффициентами [1]:

- степень неравномерности крутящего момента

$$k = \frac{M_{\max}}{M_{cp}}, \quad (1)$$

где M_{\max} - значение максимального суммарного крутящего момента за рабочий цикл двигателя; M_{cp} - среднее значение максимального суммарного крутящего момента за рабочий цикл двигателя.

- коэффициент неравномерности крутящего момента

$$k_1 = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{cp}}, \quad (2)$$

где M_{\min} - минимальное значение суммарного крутящего момента за рабочий цикл двигателя.

Для двигателя с отключением цилиндров моменты M_{\max} и M_{\min} определяются для общего количества активных цилиндров.

Крутящие моменты M_{\max} и M_{\min} находят из графиков суммарного крутящего момента $M_{\text{сум}}$ (ф) [1].

Средний момент M_{cp} можно определить из указанных графиков, или по известной формуле [1]:

$$M_{cp} = \frac{N_i}{\omega \cdot F_{\Pi}} \text{ (Нм)}, \quad (3)$$

где N_i - индикаторная мощность, Вт; ω - средняя угловая скорость вращения коленчатого вала, рад / с; F_{Π} - площадь поршня двигателя, м².

Основная часть. Пульсации суммарного крутящего момента двигателя возникают при воздействии сил давления газов в цилиндре и сил инерции от поступательно движущихся масс кривошипно-шатунного механизма.

В результате обработки суммарных крутящих моментов различных двигателей [1] получены данные о неравномерности крутящих моментов, кото-

рые сведены табл. 1.

Таблица 1. Неравномерность суммарного крутящего момента двигателя

Количество активных цилиндров, z	1	2	3	4	6	8
Суммарный момент M_{\max}	29,5	39	49	81	68	80
Суммарный момент M_{\min}	-21	-36	-33	-33	3	30
Суммарный момент M_{cp}	3,5	7,3	11	2,5	36	45
Коэффициент неравномерности крутящего момента, k_1	14,5	10	6,9	4,5	1,8	0,6
Степень неравномерности крутящего момента, k	8,42	5,3	4,1	3,2	1,9	1,3

Анализ численных значений коэффициентов k и k_1 показывает, что они изменяются по закону параболы и могут быть представлены в таком виде:

$$k = 1,198 + 7,23 \left[1 - \left(\frac{z-1}{9} \right) \right]^a; \quad (4)$$

$$k_1 = 0,5 + 14,071 \left[1 - \left(\frac{z-1}{9} \right) \right]^b, \quad (5)$$

где z - число активных цилиндров; a b - среднее значение показателей степени: $a = 3,5$; $b = 3,5$.

Уравнения (4) и (5) полученные путем аппроксимации величин k и k_1 в зависимости от количества работающих цилиндров (табл.1) с достоверностью аппроксимации 0,99.

На рис.1 приведен график степени неравномерности крутящего момента k , а на рис. 2 - график неравномерности крутящего момента k_1

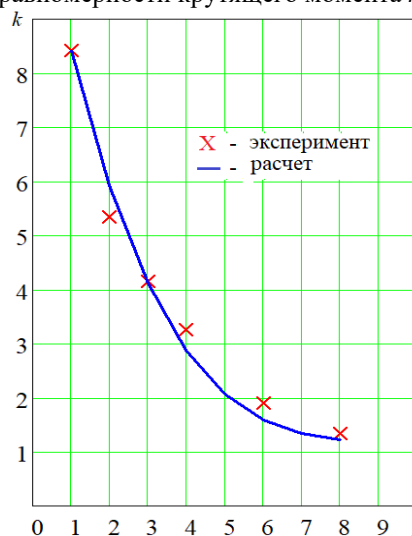


Рис. 1. Зависимость степени неравномерности суммарного крутящего момента k от числа активных цилиндров z

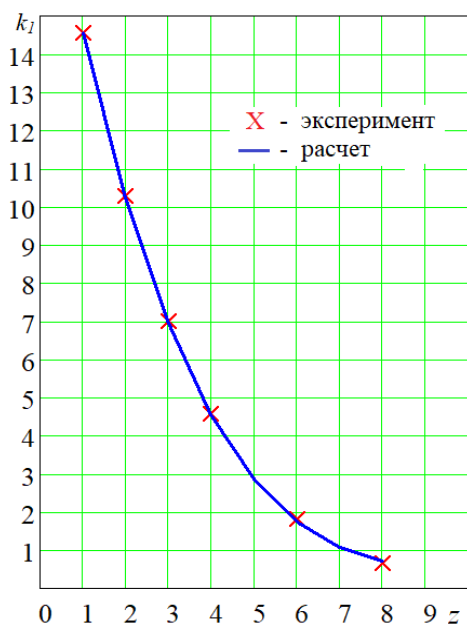


Рис. 2. Залежність коефіцієнта нерівномірності сумарного крутячого моменту k_1 від числа активних циліндрів z

Из рассмотрения графиков (рис. 1 и 2) видно, что неравномерность крутящего момента, которая характеризуется коэффициентами k и k_1 , при росте количества активных (работающих) цилиндров уменьшается, в результате чего улучшается равномерность хода двигателя.

Для возможности сравнения изменения неравномерности крутящего момента при отключении цилиндров в данном двигателе предложено оценивать изменение неравномерности момента коэффициентами:

$$\Delta k_z = \frac{k_{zi}}{k_i}; \quad (6)$$

$$\Delta k_{1,z} = \frac{k_{1,zi}}{k_{1,i}}, \quad (7)$$

где Δk_z - повышение степени неравномерности крутящего момента при уменьшении числа активных цилиндров;

k_{zi} - степень неравномерности крутящего момента при работе ДВС с числом активных цилиндров z из общего количества цилиндров и двигателя;

k_i - степень неравномерности крутящего момента при работе ДВС с числом всех работающих цилиндров;

$\Delta k_{1,z}$ - повышение коэффициента неравномерности крутящего момента по мере снижения суммарного числа z активных цилиндров;

$k_{1,zi}$ - коэффициент неравномерности крутящего момента при работе ДВС с числом активных

цилиндров z из общего количества цилиндров и двигателя;

$\Delta k_{1,i}$ - коэффициент неравномерности крутящего момента при работе ДВС с числом всех работающих цилиндров i .

Результаты расчетов.

Пример 1. Двигатель четырехтактный четырехцилиндровый рядный.

График суммарного крутящего момента приведен на стр. 128 [1] (Фиг.106).

Для этого двигателя (см. Табл. 1): $k = 3,26$; $k_1 = 4,58$. Таким образом, при количестве активных цилиндров $z = i = 4$ коэффициенты:

$$k_i = k_4 = k = 3,26;$$

$$k_{1,i} = k_{1,4} = k_1 = 4,58.$$

Тогда коэффициенты (см. табл. 1)

$k_{zi} = k_{44} = 3,26$ - при 4-х активных цилиндрах ($z = 4$) с $i = 4$;

$k_{34} = 4,152$ - при 3-х активных цилиндрах ($z = 3$) с $i = 4$;

$k_{24} = 5,342$ - при 2-х активных цилиндрах ($z = 2$) с $i = 4$;

$k_{14} = 8,428$ - при 1-м активном цилиндре ($z = 1$) с $i = 4$;

$$\Delta k_z = \frac{k_{zi}}{k_i} = \Delta k_4 = \frac{k_{44}}{k_4} = \Delta k_4 = \frac{3,26}{3,26} = 1 = \text{при 4-х}$$

активных цилиндрах ($z = 4$) с $i = 4$;

$$\Delta k_3 = \frac{k_{34}}{k_4} = \Delta k_3 = \frac{4,152}{3,26} = 1,274 = \text{при 3-х актив-}$$

ных цилиндрах ($z = 3$) с $i = 4$;

$$\Delta k_2 = \frac{k_{24}}{k_4} = \Delta k_2 = \frac{5,342}{3,26} = 1,639 = \text{при 2-х актив-}$$

ных цилиндрах ($z = 2$) с $i = 4$;

$$\Delta k_1 = \frac{k_{14}}{k_4} = \Delta k_1 = \frac{8,428}{3,26} = 2,585 = \text{при 1-м ак-}$$

тивном цилиндре ($z = 1$) с $i = 4$;

$k_{1,zi} = k_{1,44} = 4,58$ - при 4-х активных цилиндрах ($z = 4$) с $i = 4$;

$k_{1,34} = 6,991$ - при 3-х активных цилиндрах ($z = 3$) с $i = 4$;

$k_{1,24} = 10,274$ - при 2-х активных цилиндрах ($z = 2$) с $i = 4$;

$k_{1,14} = 14,571$ - при 1-м активном цилиндре ($z = 1$) с $i = 4$;

$$\Delta k_{1,z} = \frac{k_{1,zi}}{k_{1,i}} = \Delta k_{1,4} = \frac{k_{1,44}}{k_{1,4}} = \Delta k_{1,4} = \frac{4,58}{4,58} = 1 =$$

при 4-х активных цилиндрах ($z = 4$) с $i = 4$;

$$\Delta k_{1,3} = \frac{k_{1,34}}{k_{1,4}} = \Delta k_{1,3} = \frac{6,991}{4,58} = 1,526 = \text{при 3-х ак-}$$

тивных цилиндрах ($z = 3$) с $i = 4$;

$$\Delta k_{1,2} = \frac{k_{1,24}}{k_{1,4}} = \Delta k_{1,2} = \frac{10,274}{4,58} = 2,243 = \text{при } 2\text{-х}$$

активных цилиндров ($z = 2$) с $i = 4$;

$$\Delta k_{1,1} = \frac{k_{1,14}}{k_{1,4}} = \Delta k_{1,1} = \frac{14,571}{4,58} = 3,181 = \text{при } 1\text{-м}$$

активном цилиндре ($z = 1$) с $i = 4$.

На рис. 3 и 4 показано гистограммы расчетных выше коэффициентов.

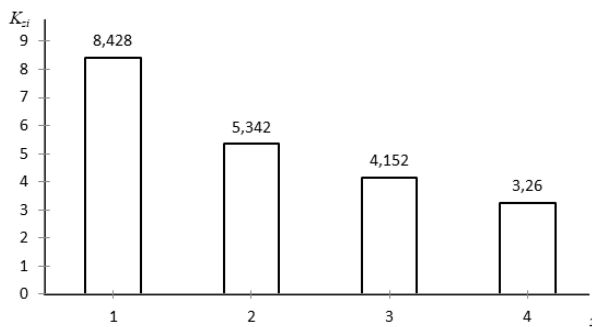


Рис. 3. Влияние числа активных цилиндров z на степень неравномерности крутящего момента k_{zi} четырехцилиндрового рядного двигателя

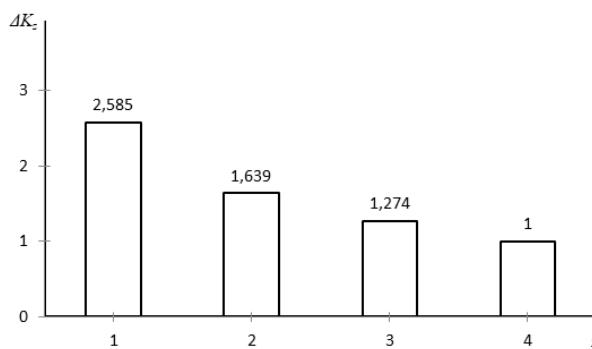


Рис. 4. Повышение степени неравномерности крутящего момента Δk_z при уменьшении активных цилиндров z четырехцилиндрового рядного двигателя

Проанализировав результаты расчетов и приведенные на рис. 3 и 4 гистограммы при всех возможных значениях числа активных цилиндров, можно отметить, что, например, для четырехцилиндрового двигателя отключения одного цилиндра повышает степень неравномерности крутящего момента на 27,4%, а при отключении двух цилиндров этот показатель увеличивается на 63,9%. При работе двигателя на одном цилиндре степень не-

равномерности крутящего момента также повышается по мере отключения цилиндров. При работе двигателя на трёх, двух и одном цилиндрах коэффициент неравномерности крутящего момента в среднем растёт соответственно: в 1,5; 2 и 3 раза.

Вывод. Разработана методика исследования влияния отключения цилиндров, в частности числа активных цилиндров, на неравномерность суммарного крутящего момента. Введено понятие степени изменения неравномерности крутящего момента двигателя с отключением цилиндров и предложено уравнение для его определения в зависимости от числа активным цилиндров. Также введено понятие степени изменения коэффициента неравномерности крутящего момента двигателя при отключении цилиндров. Установлено, что коэффициент неравномерности крутящего момента при работе двигателя на 3-х, 2-х и 1-м цилиндрах в среднем возрастает соответственно в 1,5; 2 и 3 раза.

Список литературы:

1. Попык К.Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей / К.Г. Попык. – М.: Высшая школа, 1970. – 340 с.
2. Петруня, И.А. Повышение эксплуатационной топливной экономичности транспортных дизелей регулированием их рабочих объемов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. – М., 2014. –18 с.
3. Вальехо М.П., Чайнов Н. Д. Кинематика и динамика автомобильных поршневых двигателей/ М.П. Вальехо, Н.Д. Чайнов. – М.; Инфа-М, 2020. – 283.
4. Robert L. Kinematics and Dynamics of machinery / McGraw-Hill, 2013. – 787 p.

Bibliography (transliterated):

1. Popik K.G. Dinamika avtomobilnykh i traktornykh dvigatelei [Dynamics of automobile and tractor engines]. Moscow, Higher School Publ, 1970. 340 p.
2. Petrunya I.A. Povishenie ekspluatatsionnoi toplivnoi ekonomichnosti transportnykh dizelei regulirovaniem ikh rabochikh obemov. Diss. Ph.D. tech. nauk [Increase of operational fuel efficiency of transport diesel engines by regulating their working volumes: Ph.D. tech. nauk. diss.]. Moscow, 2014.18 p.
3. Valekho M.P., Chainov N.D. Kinematika I dinamika avtomobilnikh porshnevikh dvigatelej [Kinematics and dynamics of automobile piston engines]. Moscow, Infa – M, 2020. 283 p.
4. Robert L. Kinematika I dinamika mashin [Kinematics and Dynamics of machinery]. McGraw-Hill, 2013. 787 p.

Поступила в редакцию 16.04.2021 г.

Колесникова Татьяна Николаевна – канд. техн. наук, доцент кафедры эксплуатации и ремонта машин, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепр, Украина, e-mail: tnk1403@ukr.net, +380952255253, <http://orcid.org/0000-0002-8568-4688>.

Заренбин Владимир Георгиевич – доктор. техн. наук, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепр, Украина, e-mail: zvq@mail.pgasa.dp.ua, (056)756-33-68, <http://orcid.org/0000-0001-9268-0071>.

Сакно Ольга Петровна – канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації і ремонту машин, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпр, Україна, e-mail: sakno-olga@ukr.net, (056)756-33-68, <http://orcid.org/0000-0003-4672-6651>.

ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ НЕРІВНОМІРНОСТІ СУМАРНОГО КРУТНОГО МОМЕНТУ ПРИ ВІДКЛЮЧЕННІ ЦИЛІНДРІВ

Т. М. Колеснікова, В.Г. Заренбін, О. П. Сакно

Розглянуто одне з актуальних напрямків підвищення паливної економічності і зниження токсичності відпрацьованих газів, а саме, відключення циліндрів двигунів внутрішнього згоряння на режимах холостого ходу і часткових навантажень. Існуючі на сьогодні ДВЗ із відключенням циліндрів у своєму розпорядженні достатні технічними рішеннями, що забезпечують високі паливно-економічні та екологічні показники робочого процесу двигуна. Поряд з цим такі двигуни потребують вирішення наступних завдань: поліпшення масогабаритних показників, зниження вартості і спрощення конструкції, підвищення надійності тощо. До основних завдань транспортних засобів відноситься також зниження рівня вібрації двигуна. Це завдання особливо актуальне для ДВЗ із відключенням циліндрів. При відключенні циліндрів зростає нерівномірність сумарного крутного моменту від робочих процесів у активних циліндрах і, як наслідок, нерівномірність ходу двигуна, яка впливає на динамічні характеристики автомобіля в цілому. Для вирішення цього завдання були розглянуті загальні положення нерівномірності крутного моменту двигунів внутрішнього згоряння. Були оброблені сумарні крутний момент різних двигунів і отримані дані про нерівномірність крутних моментів. Розроблено методику дослідження впливу відключення циліндрів, зокрема числа активних циліндрів, на нерівномірність сумарного крутного моменту. Введено поняття ступеня зміни нерівномірності крутного моменту двигуна з відключенням циліндрів і запропоновано рівняння для його визначення залежно від числа активних циліндрів. Також введено поняття ступеня зміни коефіцієнта нерівномірності крутного моменту двигуна при відключенні циліндрів. Виконано приклад розрахунку чотирициліндрового чотиритактного рядного двигуна для можливості порівняння зміни нерівномірності крутного моменту при відключенні циліндрів у даному двигуні. У результаті виконаних розрахунків було встановлено, що коефіцієнт нерівномірності крутного моменту при роботі двигуна на 3-х, 2-х і 1-у циліндрах у середньому зростає відповідно в 1,5; 2 і 3 рази. Проаналізовано результати розрахунків і наведені гістограми при всіх можливих значеннях числа активних циліндрів.

Ключові слова: відключення циліндрів; бензиновий двигун; паливна економічність; методика; сумарний крутний момент; нерівномірність; коефіцієнт; ступінь; гістограма; сили тиску газів.

DETERMINATION OF THE COMPONENTS OF THE TOTAL TORQUE NON-UNIFORMITY WHEN DISCONNECTING THE CYLINDERS

T. N. Kolesnikova, V.G. Zarenbin, O. P. Sakno

The article considers one of the topical directions of increasing fuel economy and reducing the toxicity of exhaust gases, namely, cylinder disconnection of internal combustion engines (ICE) in idling and partial loads. Current internal combustion engines with cylinder disconnection have enough technical solutions to ensure high fuel economy and ecological indicators of the engine working process. Accordingly, such engines require solution of the following tasks: improvement of mass-size indicators, cost reduction and design improvement, increase of reliability, etc. One of the main tasks of transport vehicles is also reducing the level of engine vibrations. This task is especially relevant for internal combustion engines with disconnected cylinders. When cylinders are disconnected, the unevenness of total torque increases from working processes in active cylinders and, as a result, the unevenness of the engine stroke, which affects the dynamic characteristics of the vehicle as a whole. To solve this problem, the general provisions of torsional momentum unevenness of internal combustion engines were considered. Total torsional torque of different engines was processed and data on the unevenness of torsional torque was obtained. The method of investigating the influence of cylinder switching, particularly the number of active cylinders on the unevenness of total torque is developed. The notion of torsional torque change degree with cylinder disconnection is introduced and the equation for its determination depending on the number of active cylinders is proposed. The notion of torsional torque coefficient change at disconnection of cylinders is also introduced. The application of the calculation of a four-cylinder inline engine for the possibility to compare changes in the torsional momentum unevenness when the cylinders are disconnected in the given engine was made. As a result of the calculations it was found that the torque unevenness coefficient at operation of the engine with 3, 2 and 1 cylinders in the average increases in 1,5; 2 and 3 times. The results of calculations were analyzed and histograms for all possible values of the number of active cylinders have been provided.

Key words: cylinder disconnection; gasoline engine; fuel economy; methodology; total torque; unevenness; coefficient; degree; histogram, gas forces.