

Косвенный метод измерений импульсного давления, создаваемого установкой маятникового типа

А. А. НЕДБАЙЛО, Е. В. ПАТОКИН, А. А. ГОРДЕЕВ

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия, e-mail: omit@vniitf.ru

Разработан косвенный метод измерений импульсного давления, создаваемого на установке маятникового типа, без использования эталонного датчика. Регламентированы основные технические характеристики установки. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность и целесообразность использования разработанного метода измерений.

Ключевые слова: импульсное давление, косвенный метод, исследование характеристик.

An indirect measurement method of the impulse pressure generated by pendulum type test facility of without use of a reference sensor has been developed. The main technical characteristics of the test facility were regulated. The possibility and feasibility of using the developed method of measurements were theoretically justified and experimentally confirmed.

Key words: impulse pressure, indirect method, research of characteristics.

В настоящее время во многих отраслях промышленности активно используются различные первичные измерительные преобразователи (датчики) импульсного (динамического, переменного) давления как отечественного, так и зарубежного производства. Существенный интерес представляет независимое (без привлечения данных, указанных разработчиком или производителем датчиков) определение основного параметра датчика (коэффициента преобразования) и погрешности градуировки. Государственный первичный специальный эталон единицы давления для области переменного давления в диапазоне $1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^6$ Па для частот $5 \cdot 10^{-2}$ – $1 \cdot 10^4$ Гц и длительностей $1 \cdot 10^{-5}$ – 10 с ГЭТ 131-81 обеспечивает воспроизведение и хранение единицы переменного (импульсного) давления амплитудой только до 25 МПа, однако амплитуды датчиков высокого и импульсного давлений превышают 25 МПа [1].

Для эксплуатации датчиков требуется экспериментально полученная градуировочная характеристика – зависимость выходного сигнала датчика от входного воздействия. Достоверность этой характеристики увеличивается, если параметры входного воздействия максимально приближены или превышают параметры входного воздействия при реальной эксплуатации. Для импульсного давления такими параметрами являются диапазон амплитуд и время нарастания (длительность фронта) импульса, поэтому при создании генераторов импульсного давления всегда стремятся одновременно выполнить две противозадачи: увеличить диапазон и уменьшить длительность фронта импульса воспроизводимого давления. В настоящее время в силу функциональных ограничений существующих технологий, задачу градуировки датчиков высокого импульсного давления (амплитудой свыше 25 МПа), как правило, разделяют на две: определение коэффициента преобразования в квазистатическом режиме работы и нахождение частотных характеристик датчика.

В большинстве случаев коэффициент преобразования датчика в квазистатическом режиме при амплитуде давления выше 25 МПа определяют с помощью специальных установок. Эти установки воспроизводят постоянное давление в жидкости, при этом перепад давления (длительность переднего фронта импульса от нескольких единиц до нескольких десятков и сотен миллисекунд) достигается в результате срабатывания ручного или электромагнитного клапана или методом копра. Для изучения частотных характеристик широко применяются ударные трубы, реже – генераторы переменного гармонического давления с верхней граничной частотой не более 10 кГц. В ударных трубах исследуется, как правило, резонансная частота датчика. По значению этой частоты определяется лишь примерное значение неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) датчика для выбранной верхней граничной частоты рабочего диапазона давления. Генераторы переменного гармонического давления обеспечивают испытательное воздействие, отличающееся по спектральному составу от реального импульсного давления, сигнал которого имеет полусинусоидальную или трапецеидальную форму. При этом в указанных генераторах в большинстве случаев используется образцовый датчик. Полученные частотные характеристики можно лишь с известными ограничениями перенести во временную область для определения рабочего диапазона длительностей фронтов измеряемых импульсных давлений. Следует отметить, что для наиболее распространенных датчиков пьезоэлектрического типа определение коэффициентов преобразования в квазистатическом режиме требует применения специализированного вторичного согласующего усилителя с высокой постоянной времени (чтобы избежать методических погрешностей градуировки).

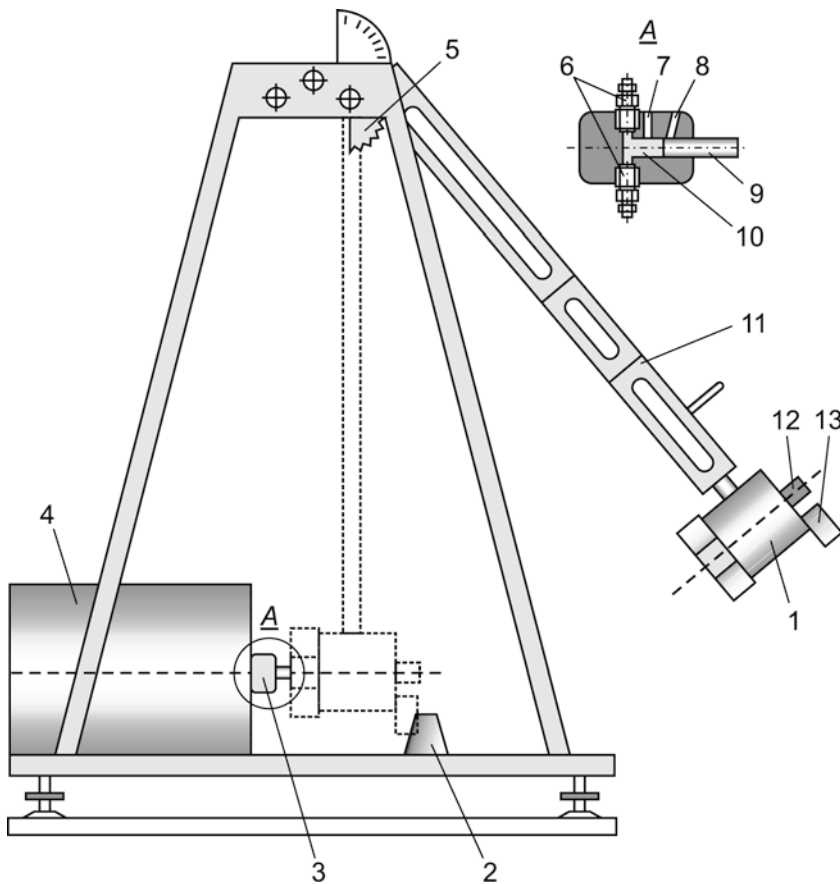


Рис. 1. Устройство установки маятникового типа:

1 – молот; 2 – отметчик положения оптический; 3 – камера высокого давления; 4 – подпор; 5 – храповый механизм; 6 – датчики давления; 7 – дренажный канал; 8 – заливной канал; 9 – поршень; 10 – рабочая жидкость; 11 – подвес; 12 – акселерометр; 13 – флажок

В РЯЦ-ВНИИФ была создана установка маятникового типа для генерирования импульсного давления с максимальной расчётной амплитудой около 400 МПа. Способ возбуждения импульса: удар по неуплотнённому поршню в цилиндре с жидкостью [2]. В отличие от аналогичных копровых моделей с вертикально падающим грузом, маятниковая конструкция проще в изготовлении, имеет меньшие габаритные размеры, относительно просто позволяет осуществлять регулировку воспроизводимых давлений. В большинстве установок подобного класса амплитуда воспроизводимого давления измеряется эталонным датчиком.

Цель данной работы – разработка косвенного метода измерений импульсного давления, возникающего в результате падения груза на сопряжённую пару – неуплотнённый поршень-цилиндр с жидкостью.

Описание установки. Схема установки представлена на рис. 1. Принцип воспроизведения импульсного давления заключается в ударе маятника – стального молота 1 массой несколько килограммов – по стальному поршню 9, притёртому в Т-образном канале стальной камеры 3 высокого давления объёмом около 4 см³. В плечах канала монтируются датчики давления 6. Для заливки условно несжимаемой жидкости 10 волновода (глицерина обезвоженного) исполь-

зуется диагонально расположенный заливной канал 8, для удаления воздушных пузырей – заглушаемый вертикальный дренажный канал 7. В центре задней поверхности молота, устанавливается акселерометр 12. Длительность фронта возбуждаемого импульса давления составляет около 1 мс. Высота закрепления камеры на подпоре 4 может варьироваться для обеспечения наилучшей соосности центральной линии поршня и оси чувствительности акселерометра. Для проведения опыта подвес 11 с молотом отводится на необходимый угол $\alpha = (N-1) \cdot 2,5 + 13$, где N – порядковый номер зуба храповика, и фиксируется с помощью храпового механизма 5. После запуска регистрирующей аппаратуры спусковое устройство освобождает молот, который наносит удар по поршню.

Установка показана как физический маятник, совершающий вынужденные колебания. Математическая модель маятника содержит уравнение вращения твёрдого тела вокруг неподвижной оси

$$J\ddot{\varphi} = M,$$

где J – момент инерции маятника относительно оси вращения; $\ddot{\varphi}$ – угловое ускорение маятника; M – суммарный момент всех сил, действующих на маятник, относительно оси вращения.

В рассматриваемом случае:

$$M = M_{г.с} + M_g,$$

где $M_{г.с} = pS_{эфф}R_n$ – момент действующих в момент удара сил гидравлического давления; p – избыточное (относительно атмосферного) давление в камере высокого давления; $S_{эфф}$ – эффективная площадь поршня; R_n – расстояние от оси подвеса маятника до центра поршня; $M_g = -mgcsin\varphi$ – момент силы тяжести маятника; m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; c – расстояние от оси подвеса до центра масс маятника; φ – угол отклонения маятника от равновесного положения.

Если пренебречь моментом силы тяжести маятника относительно его оси вращения в момент удара, то учтём что $\varphi \approx 0$, $\sin\varphi \approx 0$ и запишем

$$J\ddot{\varphi} = M_{г.с} = pS_{эфф}R_n. \quad (1)$$

Если ось чувствительности акселерометра направлена вдоль касательной к траектории движения, то измеренное на поверхности маятника (молота) ускорение a выражается как

$$a = \ddot{\varphi}R_a, \quad (2)$$

где R_a – расстояние от оси подвеса до центра акселерометра.

Объединив уравнения (1) и (2), получим

$$Ja/R_a = pS_{эфф}R_p.$$

Запишем окончательное выражение для избыточного давления:

$$p = Ja / (S_{эфф}R_pR_a). \quad (3)$$

Уравнение (3) составлено без учёта диссипативных сил. Допустим, что диссипативные силы имеют вязкую природу, тогда в момент полной остановки маятника справедливо равенство:

$$P = JA / (S_{эфф}R_pR_a), \quad (4)$$

где P – амплитуда избыточного давления; A – амплитуда ускорения.

Для измерения ускорения на поверхность молота устанавливали пьезорезистивный акселерометр 7264В-2000 (Endevco Meggitt, США). В плечах канала камеры высокого давления монтировали датчики давления: тензорезистивный Курант ДИВ (ООО «Метроник», Россия) и пьезоэлектрический Т10000 (ФКП НТИИМ, Россия) с верхними пределами 100 и 1000 МПа, соответственно. В качестве согласующей аппаратуры для датчиков 7264В-2000 и Курант ДИВ использовали модули-нормализаторы 5В38-02 (Analog Devices, США) для датчика Т10000 – усилитель 2626 (Brüel&Kjær, Дания). Регистратором служил 16-битный модуль аналого-цифрового преобразования QMBox15-16 (R-Technology, Россия), подключаемый по интерфейсу USB 2.0 к персональному компьютеру. Частота дискретизации модуля при исследованиях составила 166 кГц на канал.

Проведение предварительных исследований. Итоговая формула (4) имеет несколько составляющих погрешности, основная – составляющая ударного ускорения. В целях уменьшения общей погрешности метода были проведены полномасштабные исследования параметров измерительных каналов (ИК) ускорения и давления. Показания ИК давления использовали в качестве опорных значений.

Рассмотрим характеристики ИК ускорения. Неравномерность АЧХ составила менее 1 % для верхней граничной частоты 4,2 кГц, определённый при этом коэффициент преобразования ИК равен 0,503 мВ·с²/м. Исследования выполняли на виброустановке 4808 (Brüel&Kjær, Дания), возбуждаемый уровень виброускорения контролировали абсолютным методом с помощью высокоточного лазерного виброметра VDD-E-600/OFV-505 (Polytec GmbH, Германия). Существенным преимуществом акселерометров данного типа является способность измерять постоянное (линейное) ускорение. Как следствие, существует возможность осуществлять гра-

дуировку ИК ускорения в статическом режиме и достаточно точно исследовать одну из основных характеристик – нелинейность АЧХ во всем реализуемом диапазоне ускорений. Нелинейность и коэффициент поперечной чувствительности исследовали в диапазоне линейных ускорений 200–2400 м/с² на центробежной установке с приписанной погрешностью, менее 0,07 %, определённой расчётно-экспериментальным методом. В результате нелинейность составила менее 0,2 %, коэффициент поперечной чувствительности менее 2,2 % от коэффициента преобразования по основной оси. Для исследования температурной чувствительности в диапазоне температур 10–27 °С использовали камеру тепла и холода, а также описанные выше виброустановку и лазерный виброметр. Получили значение температурной чувствительности не более 0,04 %/°С. Также были определены максимальный уровень динамической деформации установочной поверхности акселерометра (менее 40 отн. ед.) и коэффициент поперечных составляющих ударного ускорения (не более 17 %).

В рамках исследований ИК давления на базе датчика Курант ДИВ выполняли его градуировку на грузопоршневом манометре МП-2500 (класс точности 0,02) и определяли резонансную частоту датчика методом [3]. Частота составила не менее 12 кГц.

Было проведено исследование метрологических характеристик модуля аналого-цифрового преобразования QMBox15-16 с помощью прецизионного калибратора Fluke 5720А. Погрешность измерения переменного напряжения модуля составила не более 0,03 %, отношение шум/сигнал – не более 0,83 %.

Момент инерции маятника находили из [4]:

$$J = T^2 M g c / (16 K^2), \quad (5)$$

где T – период одного колебания маятника; M – масса маятника; K – полный эллиптический интеграл первого рода угла отклонения маятника от равновесного положения.

Для определения периода T на молоте был установлен металлический флажок 13 (см. рис. 1). При пересечении ребром флажка оптической оси отметчика положения 2 на выходе отметчика регистрировался перепад напряжения.

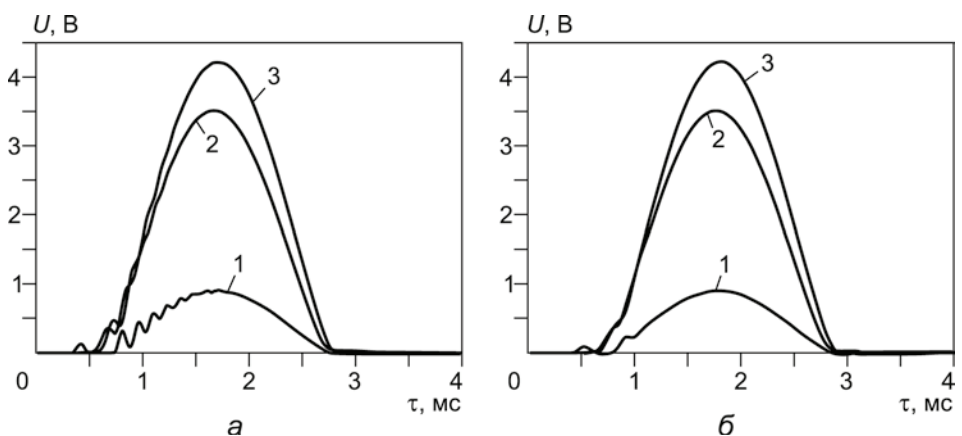


Рис. 2. Сигналы ускорения и давления (амплитудой $P \approx 100$ МПа) до (а) и после (б) фильтрации сигналов датчиков: 7264В (1); Т10000 (2); Курант ДИВ (3)

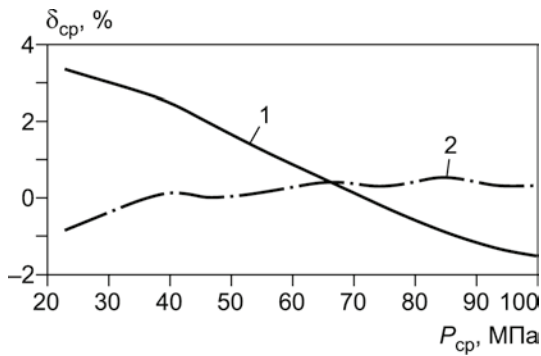


Рис. 3. Графики зависимостей $\delta_{ср}(P_{ср})$ датчиков Т10000 (1) и Курант ДИВ (2)

Т а б л и ц а 1

Относительная разница $\delta_{ср}$, %, рассчитанных косвенным методом и измеренных значений амплитуд давления $P_{ср}$

Датчик	$P_{ср}$, МПа								
	22,88	38,24	47,44	56,71	65,85	75,12	84,40	93,96	103,37
Курант ДИВ	-0,83	0,09	0,02	0,20	0,42	0,31	0,53	0,32	0,37
Т10000	3,34	2,59	1,86	1,12	0,44	-0,25	-0,86	-1,34	-1,62

Т а б л и ц а 2

Результаты экспериментов

α , °	Датчик	U , В	A , м/с ²	P , МПа	τ , мс	δ , %
9,0	Курант ДИВ	0,949	—	23,317	1,20	-0,61
	Т10000	0,721	—	22,409	1,20	3,42
	7264В	0,200	397,614	23,175	1,20	—
13,0	Курант ДИВ	1,569	—	38,362	1,10	-0,02
	Т10000	1,205	—	37,451	1,10	2,41
	7264В	0,331	658,052	38,354	1,10	—
15,5	Курант ДИВ	1,932	—	47,353	1,05	0,08
	Т10000	1,498	—	46,558	1,05	1,79
	7264В	0,409	813,121	47,392	1,05	—
18,0	Курант ДИВ	2,312	—	56,667	1,05	0,2
	Т10000	1,809	—	56,224	1,05	0,99
	7264В	0,490	974,155	56,778	1,05	—
20,5	Курант ДИВ	2,688	—	65,882	1,04	0,25
	Т10000	2,121	—	65,921	1,04	0,19
	7264В	0,570	1133,201	66,048	1,04	—
23,0	Курант ДИВ	3,065	—	75,123	1,02	0,41
	Т10000	2,436	—	75,711	1,02	-0,37
	7264В	0,651	1294,235	75,434	1,02	—
25,5	Курант ДИВ	3,440	—	84,314	1,02	0,60
	Т10000	2,753	—	85,563	1,02	-0,87
	7264В	0,732	1455,268	84,820	1,02	—
28,0	Курант ДИВ	3,824	—	93,956	1,01	0,39
	Т10000	3,075	—	95,571	1,01	-1,31
	7264В	0,814	1618,290	94,321	1,01	—
30,5	Курант ДИВ	4,209	—	103,415	1,00	0,39
	Т10000	3,397	—	105,579	1,00	-1,66
	7264В	0,896	1781,312	103,823	1,00	—

Отметчик положения, представляет собой оптопару с напряжением питания +5 В. При отведении молота от равновесного положения на небольшой (менее 5°) угол, регистратор переводился в режим записи, после чего молот расфиксировался и совершал более 33 свободных затухающих колебаний. Измерение начального угла отклонения осуществлялось электронным угломером. В результате регистрировалась последовательность прямоугольных импульсов, определялась длительность 33 колебаний, и вычислялся период одного колебания маятника, примерно составляющий 1,5 с.

Для нахождения центра масс молот с установленными на нём необходимыми элементами вывешивался в равновесное положение на ножовом ребре стальной закалённой призмы. Дальнейшее нахождение расстояний с (см. формула (5)) и R_a , R_n (см. (4)) осуществлялось с помощью штангенциркулей класса точности 0,1. При этом получен момент инерции $J=2,606$ кг·м².

Эффективную площадь поршня определяли согласно [5] как сумму рассчитанных площади поперечного сечения поршня и половины площади кольцевого зазора пары поршень–цилиндр. Для вычисления площади поперечного сечения поршня рычажной скобой СР 25 измеряли диаметр поршня в области заходного торца в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для вычисления площади кольцевого зазора длиномером Labconcept 500 измеряли внутренний диаметр цилиндра камеры высокого давления в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В результате получили $S_{эфф}=1,131737$ м².

Результаты экспериментов. Было проведено десять циклов опытов. Зуб храпового механизма, обеспечивающий необходимый угол подъёма маятника, имел максимальный порядковый номер 8, что соответствует углу $\alpha \approx 30^\circ$ (минимум $\alpha \approx 9^\circ$).

Сигналы измерительной информации подвергались цифровой фильтрации с аппроксимацией 4-го порядка по Баттерворту. Для исключения влияния фильтра на АЧХ в области высоких частот на основании наименьшего полученного значения 1 мс длительности фронта полусинусоидального сигнала выбрана верхняя цифровая частота среза 4,2 кГц. Для уменьшения влияния нелинейности ИК (не более 0,15 %), на базе датчика Курант ДИВ при расчёте амплитуды давления использовали коэффициенты (соответствуют реализуемому уровню давления) преобразования градуировочной характеристики канала.

Характерные графики сигналов ускорения и давления в единицах электрического напряжения до и после использования цифрового низкочастотного фильтра с частотой среза 4,2 кГц представлены на рис. 2. На рис. 3 и в табл. 1 приведены полученные по результатам десяти циклов графики за-

висимостей $\delta_{cp}(P_{cp})$, где для каждого датчика давления

$$\delta_{cp} = \sum_{i=1}^{10} \delta_i / 10; P_{cp} = \sum_{i=1}^{10} P_i / 10.$$

Результаты экспериментов одного цикла представлены в табл. 2, где U – амплитудное значение зарегистрированного напряжения; τ – измеренное значение длительности фронта; δ – относительная разница между измеренной датчиком давления амплитудой давления и значением амплитуды, рассчитанным косвенным методом.

По данным табл. 2 максимальная амплитуда ударного ускорения на поверхности молота составила не более 2000 м/с², длительность фронта импульса давления – примерно 1 мс. Из табл. 1 и рис. 3 следует, что максимальное расхождение показаний ИК и значений, полученных косвенным методом, не превысило 1 % для датчика Курант ДИВ и 4 % – для датчика Т10000. Значительное расхождение указанных значений для датчика Т10000 предположительно объясняется определённой нелинейностью (примерно 2 %) его АЧХ, а также ненормированной погрешностью определения паспортного коэффициента преобразования. На основании результатов выполненных исследований были оценены доверительные границы погрешности измерения импульсного давления косвенным методом при вероятности 0,95. Получен диапазон $\pm 2,2$ %, что согласуется с экспериментальными данными. При оценивании учитывали не только основные инструментальные погрешности, но и погрешность измерения момента инерции, обусловленную зависимостью периода собственных колебаний маятника от амплитуды колебаний (анизохронностью) [4], погрешность измерения эффективной площади поршня, связанную с влиянием деформации пары поршень–цилиндр при высоких давлениях, а также погрешность вследствие термической зависимости размеров этой пары [5]. Получены следующие значения погрешности измерения

момента инерции, амплитуды ускорения, расстояний R_a , R_n и эффективной площади $S_{эфф}$ – соответственно 0,31; 0,92; 0,45 и 0,06 %.

Закключение. В статье разработан косвенный метод измерений импульсного давления амплитудой до 100 МПа и длительностью фронта 1–2 мс. Давление создаётся на установке маятникового типа. Доверительные границы погрешности измерения импульсного давления косвенным методом не превышают $\pm 2,2$ % для $P=0,95$. Применение косвенного метода позволяет осуществлять градуировку датчиков переменного давления без использования эталонного датчика и таким образом обеспечивать независимую градуировку.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ Р 8.801–2012.** Государственная поверочная схема для средств измерений переменного давления в диапазоне от $1 \cdot 10^2$ до $2,5 \cdot 10^7$ Па для частот от $5 \cdot 10^{-1}$ до $1 \cdot 10^4$ Гц и длительностей от $1 \cdot 10^{-5}$ до 10 с при постоянном давлении до $5 \cdot 10^6$ Па.
2. **Пат. 2560921 РФ.** Устройство для калибровки датчиков импульсного давления / А. А. Боронин, А. А. Втулкин, С. И. Карачинский, И. А. Мальгин, А. В. Рубашин, О. А. Тимофеев // Изобретения. Полезные модели. 2015. № 23.
3. **Шипунов А. В.** Определение динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков давления: сравнительный анализ методов // Приборы и системы управления. 1999. № 7. С. 35–37.
4. **Гернет М. М., Ратобыльский В. Ф.** Определение моментов инерции. М.: Машиностроение, 1969.
5. **Жоховский М. К.** Теория и расчёт приборов с неуплотнённым поршнем. М.: «Издательство стандартов», 1959.

Дата принятия: 13.06.2017.

