Научная статья
Original article
УДК 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

RESEARCH OF THE PRINCIPLE OF OPERATION OF THE CRANK MECHANISM

Москвитин Александр Александрович, Студент 2 курс, Механико-технологический факультет, Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск
Зыбин Денис Николаевич, Студент 2 курс, Механико-технологический факультет, Новосибирский государственный технический университет, Россия, г. Новосибирск
Научный руководитель: Чусовитин Николай Анатольевич, к.т.н. Новосибирский государственный технологический университет, Россия, г. Новосибирск

Moskvitin Alexander Alexandrovich, Student 2nd year, Faculty of Mechanics and Technology, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
Zybin Denis Nikolaevich, Student 2nd year, Faculty of Mechanics and Technology, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
Scientific Supervisor: Chusovitin Nikolay Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Novosibirsk State Technological University, Novosibirsk, Russia

Аннотация: Статья посвящена одному из самых древних и устоявшихся механизмов, которым является кривошипно-шатунный механизм. На протяжении долгих лет разработки, было спроектировано и реализовано много различных конструкций, но именно этот механизм как был, так и остался одним из лучших в техническом плане. Впервые конструкция была изобретена в Китае в I веке н.э., но использовалась она исключительно в колодцах и ручных мельницах. [1] Кривошипно-шатунный механизм делиться на аксиальный, ось кривошипа совпадает с осью поршня, и дезаксиальный (ось кривошипа отклонена на небольшое расстояние 1.5-6 мм) при работе данного механизма вредными силами являются сила трения, и сила инерции движущихся деталей. [4] В наше время данный механизм довольно распространён в машиностроении, в основном используемый в двигателей внутреннего сгорания (ДВС), преобразующий поступательное движения поршня во вращательное движение коленвала, и наоборот. КПД данных двигателей как и механизма составляет около 40%. Что уже уступает, созданным электродвигателям их КПД около 80% , но лучше чем паровой двигатель у которого КПД ≈ 8% . [3] Также этот механизм используется в компрессорах в обратном его действии. По формуле Чебышева степень свободы КШМ будет равна 1 (W = 3n - 2p1- p2 = 3*3 - 2*4 - 0 = 1), данный в основном состоит их кривошипа, шатуна, и ползуна расположенные на опоре. Это один из самых простых и самых полезных механизмов в истории человечества.

Summary: The article is dedicated to one of the most ancient and well-established mechanisms in history, the crank mechanism. Nowadays, this mechanism is quite common in mechanical engineering, mainly used in internal combustion engines (ICE), which converts the translational motion of the piston into the rotational motion of the crankshaft, and vice versa. The efficiency of these engines as well as the mechanism is about 40%. Which is already inferior to the created electric motors, their efficiency is about 80%, but better than a steam engine with an efficiency of ≈ 8%. Also, this mechanism is used in compressors in its

reverse action. According to Chebyshev's formula, the degree of freedom of the crank mechanism will be equal to 1 (W = 3n - 2p1- p2 = 3*3 - 2*4 - 0 = 1), this mainly consists of their crank, connecting rod, and slider located on the support. This is one of the simplest and most useful mechanisms in the history of mankind.

Ключевые слова: механизм, шестерни, кривошип, шатун, поступательное движение, вращательное движение.

Keywords: mechanism, gears, crank, connecting rod, translational motion, rotational motion.

Цель: Смоделировать и построить кривошипно-шатунный механизм, изучить зависимость поступательного движения от длины звеньев. Сделать выводы о проделанной работе и попытаться обосновать полученную из опытов информацию.

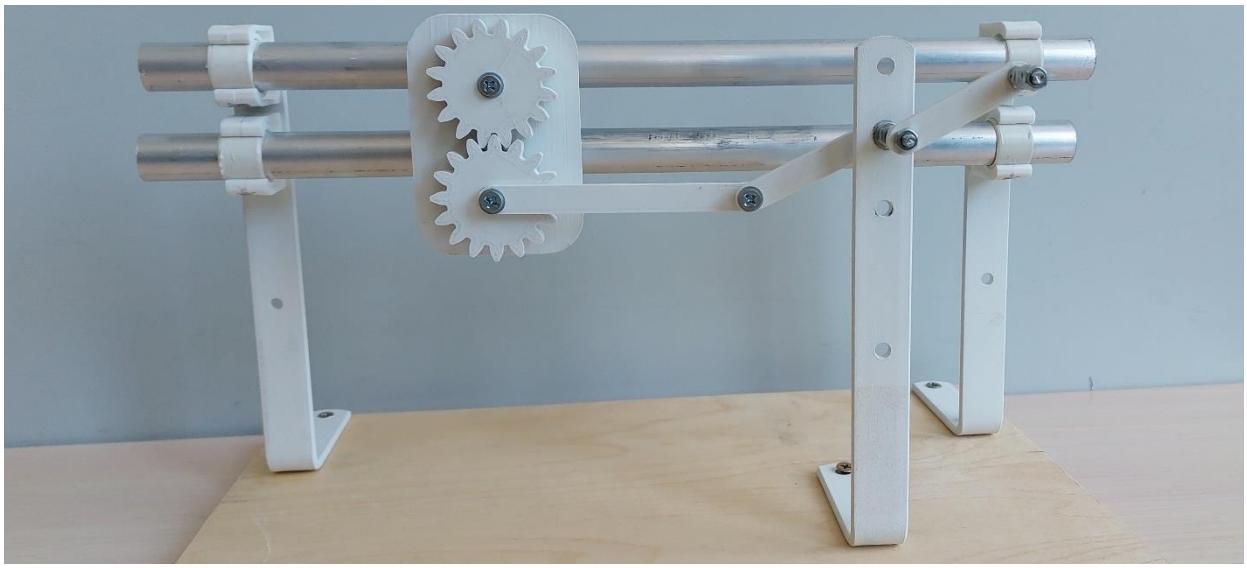


Рис. 1 Физическая модель механизма

Описание механизма

Проект возвратно–поступательного механизма состоит из нескольких отдельных деталей. В механизме есть как подвижные детали, которые находятся в движении при работе, так и статичные, которые в основном служат опорой, либо креплением. Данный проект относится к возвратно-поступательному механизму и в частности к двигателю, такому как двигатель внутреннего сгорания, включающему такой механизм.

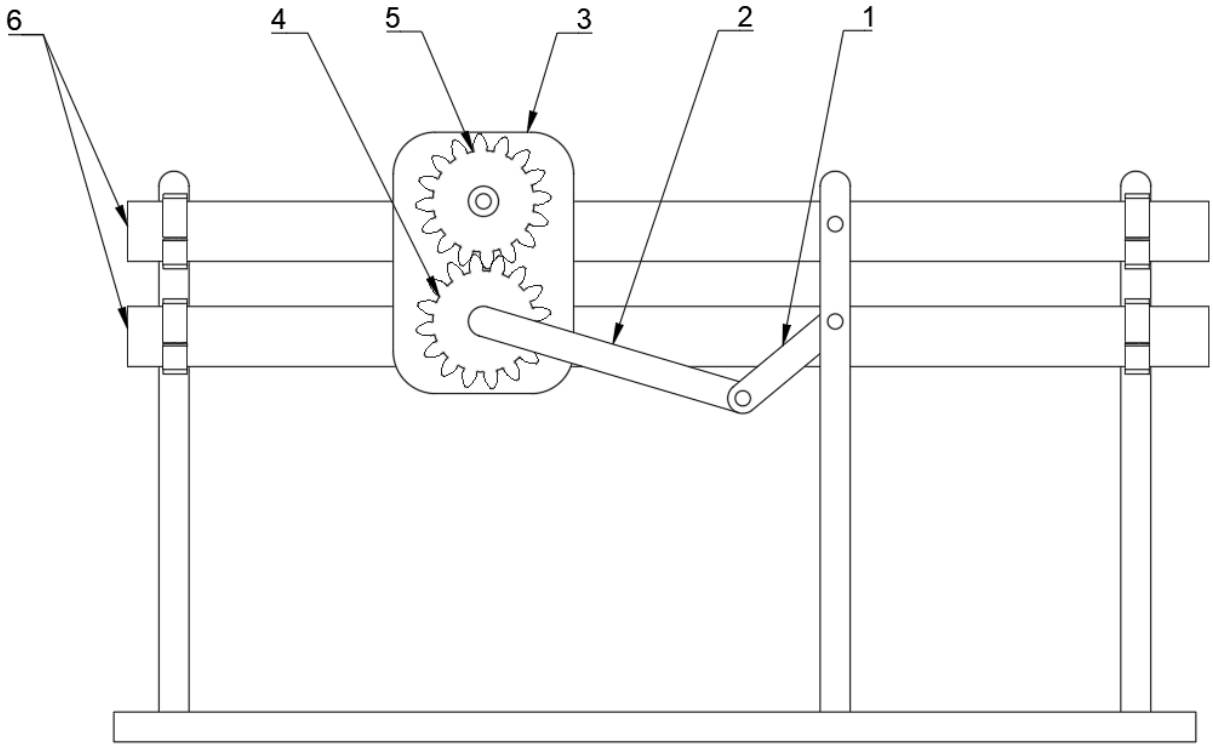


Рис. 2 Схема возвратно-поступательного механизма

Состав и наименование деталей: 2 трубки Д20 ПВХ, корпус 87х60х54мм с скруглениями R7 с 4 сторон, 2 одинаковых зубчатых колеса (16 зубьев, модуль 2.5), 2 звена 90х5мм и 40х5мм, а также элементы крепления, уголки и хамуты. Детали, которые участвуют в движении механизма были напечатаны на 3D принтере, PLA-пластиком, при 40% заполнении. Остальные детали крепежа и горизонтальная опора были куплены в строительных магазинах.

Описание работы механизма: вращательное движение, которое подается на центральный вал, а в следствии и на звено 1, переходит на звено 2, и в результате, движение становится возвратно-поступательным, т.к. сам корпус закреплен на двух направляющих 6, которые не дают ему отклониться, и он

может двигаться только по поверхности одной плоскости. Отверстия, расположенные на креплении корпуса сконструированы с увеличенных диаметром, по отношению к направляющими трубкам, а также произведены сквозные прорези через крепления для более свободного движения корпуса как по направляющим, так и всего механизма в целом. Два зубчатых колеса 4 и 5, закрепленных болтами на корпусе, служат в большей степени для того, чтобы снизить нагрузку на крепление корпуса к направляющим, при подъеме и спуске звена 1 на протяжении одного полного оборота. В течении которого, звено 2, которое непосредственно закреплено на зубчатом колесе 4 и имеет крепление со звеном 1 валом, совершает неполный оборот вокруг оси вала, на котором расположено зубчатое колесо 4, относительно корпуса. За счет этого, зубчатые колеса, которые находятся в зацеплении, совершают вращательное движение вокруг валов на корпусе соответственно. Включение шестерен в механизм не имеет особого внимания к работе конструкции, потому что они были введены в механизм для отвода нагрузки с крепления корпуса, на движение колес. Вращательное движение, как в следствии и поступательное происходят предпочтительно как в одном, так и в противоположном направлении, в соответствии с направлением вращения начального вала, который придает движение всей конструкции.

Теоретический вывод зависимости поступательной скорости корпуса от длины одного из звеньев.

Нам необходимо узнать линейную скорость корпуса, а вывести формулу по нахождению линейной скорости корпуса 3, необходимо зная только угловую скорость ω_0. Она будет постоянная для всех экспериментов ($\omega_0 = 15об/с \cong 1{,}57рад/с$)

Представим схему механизма, как простейший треугольник геометрического положения звеньев в некоторый момент времени. Для удобства расчетов, берем положение звена 3 при отклонении от проведенной горизонтальной оси на угол $\varphi = 30^{\circ}$.

Обозначим стороны треугольника r, l и x, радиус кривошип, длина шатуна, положение корпуса, относительно оси вращения кривошипа соответственно.

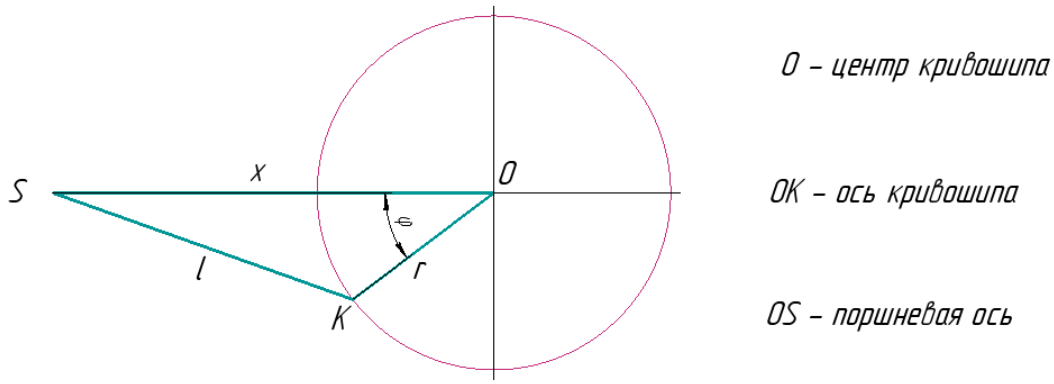


Рис.3 Треугольник KOS, образованный осями механизма

Из теоремы косинусов следует, что $l^2 = r^2 + x^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot cos\ (\varphi)$

$$l^2 - r^2 = x^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot cos\ (\varphi)$$

Добавили к правой части уравнения слагаемое r^2 и сразу же вычли его:

$$l^2 - r^2 = x^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot cos(\varphi) + r^2 - r^2$$

Расписали по основному тригонометрическому тождеству:

$$l^2 - r^2 = x^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot cos(\varphi) + r^2(\left(cos^2(\varphi) + sin^2(\varphi)\right) - 1)$$

Перенесли в левую часть r^2 и $r^2 \cdot sin^2(\varphi)$:

Раскрыли скобки и перенесли в левую часть r^2 и $r^2 \cdot sin^2(\varphi)$:

$$l^2 - r^2 + r^2 - r^2 \cdot sin^2(\varphi) = x^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot cos(\varphi) + r^2 \cdot cos^2(\varphi)$$

В правой части получили формулу квадрата разности:

$$l^2 - r^2 \cdot sin^2(\varphi) = (x - r \cdot cos\ (\varphi))^2$$

Выразим отсюда x :

$$x = r \cdot cos(\varphi) + \sqrt{l^2 - (r \cdot sin\ (\varphi))^2}$$

Получили формулу для расчета перемещения корпуса механизма.

Далее необходимо установить дифференциальную зависимость:

$$\mathrm{x}' = \frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \varphi}$$

Таким образом, аналитическая скорость корпуса 3 представлена выражением:

$$x' = -r \cdot \sin(\varphi) - \frac{r^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2(\varphi)}} = V_a$$

Проводить будем 2 эксперимента, совокупностью по 5 опытов на каждый и последний эксперимент с 10 опытами. [2]

Эксперимент 1. Вывод экспериментальной зависимости скорости корпуса от длины кривошипа.

Будем изменять длину кривошипа в диапазоне размерных величин от 30 до 70 мм, $\varphi = 30^{\circ}$, l = 90 мм.

Табл.1 эксперимента №1

Номер опыта №	Длина кривошипа r, мм	Линейная скорость корпуса , V_a (мм/с)
1	30	19,39
2	40	27,9
3	50	37,52
4	60	48,37
5	70	60,6

Составим по полученным данным график зависимости $V_a(r)$:

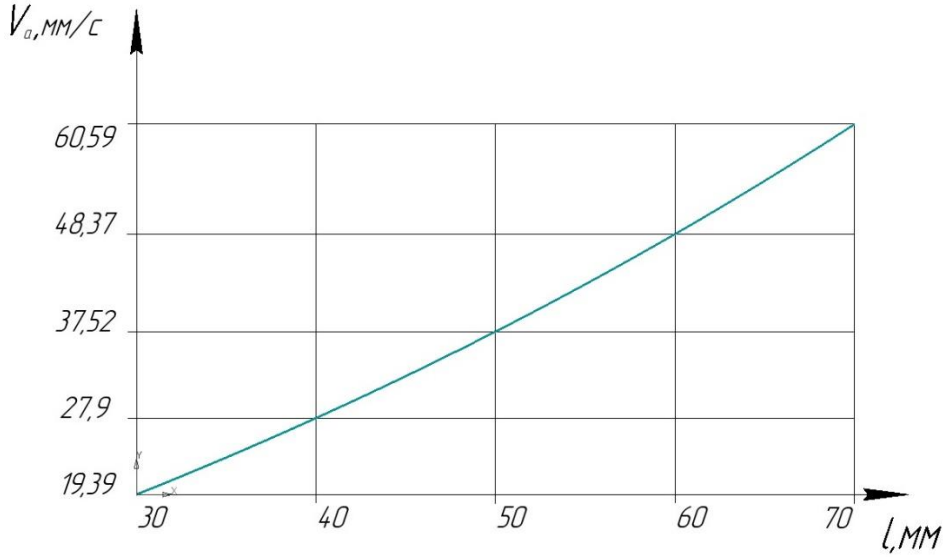


Рис.4 График зависимости $V_a(r)$

Эксперимент 2. Вывод экспериментальной зависимости скорости корпуса от длины шатуна.

В этом эксперименте будем изменять уже длину шатуна в диапазоне размерных величин от 70 до 110 мм, начальный угол так же $\varphi = 30^{\circ}$ и r = 50 мм.

Табл.2 Эксперимента №2

Номер опыта №	Длина шатуна l, мм	Линейная скорость корпуса V_a, мм/с
1	70	41,56
2	80	39,25
3	90	37,5
4	100	36,18
5	110	35,1

Составим по полученным из второго эксперимента данным график $V_a(l)$:

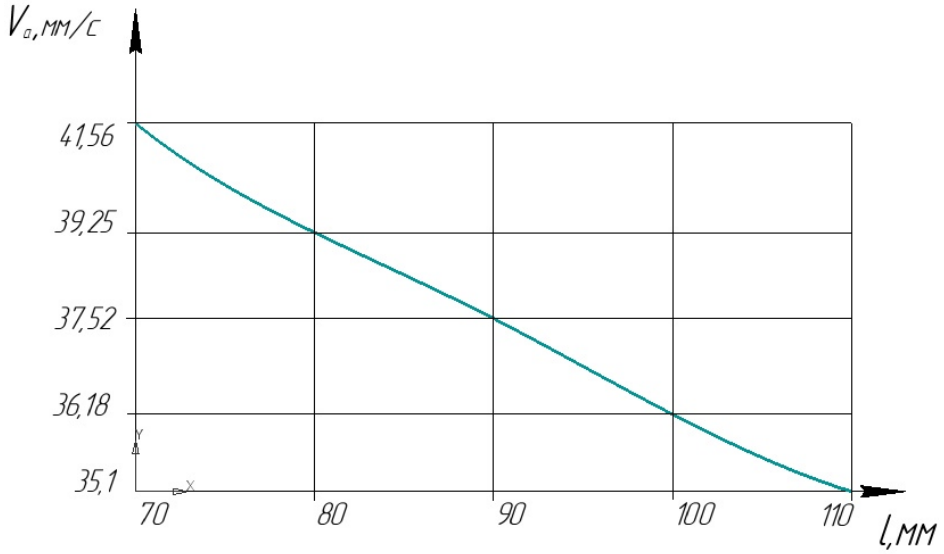


Рис. 5 График зависимости $V_a(l)$

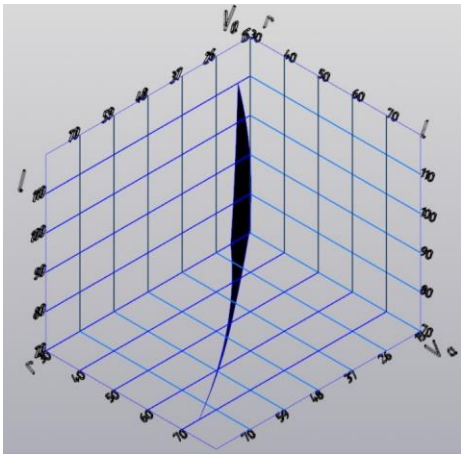
Эксперимент 3. Вывод экспериментальной зависимости скорости корпуса от длин кривошипа и шатуна.

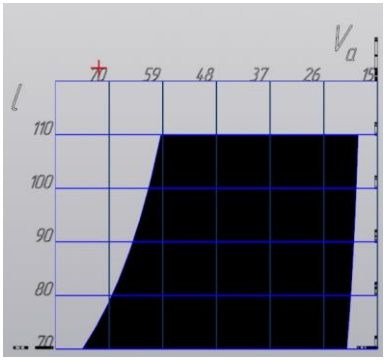
Для получения данной зависимости, изменяем и длину кривошипа, и длину шатуна. Угол так же оставляем $\varphi = 30^{\circ}$.

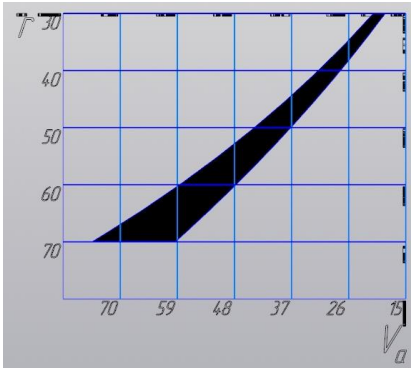
Табл. 3 Эксперимента №3

Номер опыта №	Длина кривошипа r, мм	Длина шатуна l, мм	Линейная скорость, мм/с
1	30	70	20,69
2	40	80	28,95
3	50	90	37,52
4	60	100	46,34
5	70	110	55,34
6	30	110	18,58
7	40	100	27,07
8	50	90	37,52
9	60	80	51,13
10	70	70	70,14

Рис. 6 График зависимости $V_a(r, l)$







Вывод

В ходе проделанной работы, был изучен кривошипно-шатунный механизм, а также принцип его работы, произведены три эксперимента, в ходе которых были установлены три разных зависимости величин для трех случаев.

В первом эксперименте при увеличении длины кривошипа увеличилась и линейная скорость корпуса. Это объясняется тем, что увеличение длины кривошипа привело к увеличению скорости шатуна, который непосредственно закреплен на корпусе, поэтому и скорость корпуса тоже увеличилась.

Во втором же эксперименте была увеличена длина шатуна, что привело к снижению линейной скорости корпуса. Это объясняется тем, что увеличивая длину шатуна, уменьшалась длина хода корпуса по направляющим. Угловая скорость на кривошипе постоянная, то скорость корпуса стала меньше.

В третьем эксперименте были изменены и кривошип и шатун, были рассчитаны скорости для данных значений и по полученным данным был построен график. Так как вычисления производились при изменении сразу обоих параметров механизма, то и график полученной зависимости получился как поверхность в пространстве.

Литература

1. История кривошипного механизма. [Изобретения и исследования]; Текст: Электронный - URL: http://innovatory.narod.ru/crank.html (дата обращения: 05.05.2022). – Дата обновления: 03.03.2022.
2. Кривошипно-шатунный механизм. [Материал из Википедии - свободной энциклопедии] Текст: Электронный - URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кривошипно-шатунный_мех.. (дата обращения: 05.05.2022). – Дата обновления: 10.02.2022.
3. Коэффициент полезного действия: За рулем.РФ [Электронный ресурс]. URL: https://www.zr.ru/content/articles/929146-5-voprosov-.. (дата обращения: 15.06.2022)
4. Виды и общая схема устройства кривошипно-шатунного механизма: сайт Студми. Учебные материалы для студентов. [Электронный ресурс]. URL: https://studme.org/332102/tehnika/krivoshipno_shatunn.. (дата обращения: 15.06.2022).

Literature

1. The history of the crank mechanism. [Inventions and research]; Text: Electronic – URL: http://innovatory.narod.ru/crank.html (accessed: 05.05.2022). – Date of update: 03.03.2022.
2. Crank mechanism. [Material from Wikipedia – free encyclopedia] Text: Electronic -URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кривошипно-шатунный_мех.. (accessed: 05.05.2022). – Update date: 10.02.2022.
3. Efficiency: Behind the wheel.RF [Electronic resource]. URL: https://www.zr.ru/content/articles/929146-5-voprosov-.. (accessed: 06/15/2022)
4. Types and general scheme of the crank mechanism device: Studio website. Educational materials for students. [electronic resource]. URL: https://studme.org/332102/tehnika/krivoshipno_shatunn.. (accessed: 06/15/2022).

© Москвитин А.А., Зыбин Д.Н. 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.

Для цитирования: Москвитин А.А., Зыбин Д.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.