

# МОНИТОРИНГ ФАКТИЧЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ ЭКСКАВАТОРОВ ПО ШУМУ И ВИБРАЦИИ



**Алексей Алексеевич Хорешок**, д.т.н., проф., зав. кафедрой «Горные машины и комплексы»



**Андрей Валерьевич Кудреватых**, ст. преподаватель кафедры «Эксплуатация автомобилей» ГУ «Кузбасский государственный технический университет»

В связи с выходом из кризиса мировой экономики и улучшением ситуации в металлургической отрасли увеличивается спрос на энергетический и коксующийся уголь. Увеличение объемов добываемого угля требует соответствующего увеличения темпов роста производительности экскаваторно-автомобильных комплексов, что невозможно без применения совершенного высокотехнологичного оборудования, отвечающего современным требованиям безопасности, производительности и энергосбережения.

В настоящее время разрезы ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» оснащены большим количеством горного и транспортного оборудования для выполнения объемов работ по добыче угля и перевозке.

Несмотря на это, значительная часть техники имеет высокий уровень износа. Так, средний срок эксплуатации экскаваторов составляет более 16 лет (таблица 1).

Значительный срок службы сказывается на изменении надежности экскаваторов (таблица 2).

На сегодняшний день экскаваторный парк ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» представлен

как электрическими карьерными мехлопатами (64%) — в основном отечественного производства, так и гидравлическими обратными лопатами импортных производителей (12%), а также драглайнами (24%).

В последнее время наметилась тенденция увеличения доли гидравлических обратных лопат. Это связано с программой технического перевооружения компании, в которой основная ставка делается на гидравлические экскаваторы как на более экономичные, надежные, энерговооруженные и производительные.

Кроме того, гидравлические экскаваторы более адаптированы к сложным горно-геологическим условиям работы, преобладающим на угольных полях ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь», как технологически более гибкие. Масса гидравлического экскаватора меньше, он может быть оборудован как «прямой лопатой», так и «обратной», наделен большей удельной мощностью, мобилен, позволяет проводить качественную селективную выемку.

Несмотря на все преимущества гидравлических экскаваторов, механическая лопата до сих пор является более надежной и живой машиной, она проще и дешевле в обслуживании. Применительно к крупным долговременным карьерам с развитыми электросетями, где горно-геологическая обстановка не требует выборочной экскавации на уровне одного горизонта, механические лопаты подходят наилучшим образом.

Конечно, конструктивную схему механической лопаты прогрессивной не назовешь, и других преимуществ у морально устаревшего оборудования перед современной гидравлической техникой, кроме простоты и надежности, попросту нет. Более того, постоянное повышение надежности гидроагрегатов, внедрение электронных систем контроля рабочих параметров, более доступная агрегатная компоновка оборудования позволяют создавать машины, превосходящие по надежности механические лопаты даже при температурах эксплуата-

Наименование предприятий	Всего единиц	Средний срок эксплуатации, лет	Износ по сроку эксплуатации, %	Износ по выполненным объемам работ, %
УК «Кузбассразрезуголь»	256	16,6	90,0	81,8
Кедровский	31	14,7	85,0	76,6
Моховский	31	19,9	95,0	104,6
Сартакинский	19	16,3	94,0	81,9
Караканский	12	18,1	97,0	88,8
Бачатский	37	18,4	90,0	102,6
Краснобродский	43	15,8	90,0	72,5
Вахрушевский	16	19,2	96,0	82,9
Талдинский	27	16,9	91,0	82,9
Ерунаковский	17	13,0	78,0	78,8
Калтанский	10	14,2	86,0	53,1
Осинниковский	13	16,6	87,0	75,5

Таблица 1. Износ парка экскаваторов в ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» по сроку службы и выполненным объемам работ

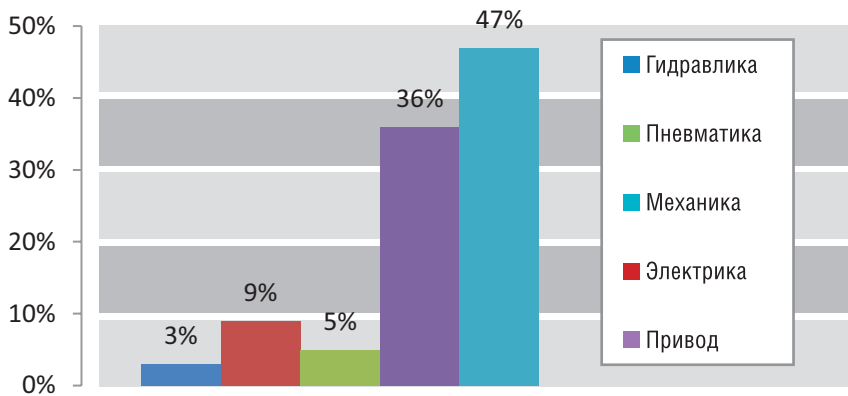


Рисунок 1. Распределение времени аварийных простоев по основным системам электрических экскаваторов, эксплуатируемых в ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь»

ции до  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже. Имеется опыт по безотказной эксплуатации таких машин в течение 5-6 лет, в том числе и на предприятиях, входящих в состав ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь».

Анализ полученной в компании информации о производительности и эксплуатационной надежности электрических экскаваторов свидетельствует о том, что наибольший удельный вес простоев приходится на отказ механической части (рисунок 1).

Более 47% времени аварийных простоев приходится на долю механических поломок, прежде всего в редукторах (40%).

Так, например, отказ редукторов занимает у экскаваторов на Бачатском, Краснобродском разрезах — третье место; на Калтанском и Моховском разрезах — второе место; на Кедровском разрезе — первое место; на Талдинском — пятое.

Это обуславливает необходимость интенсификации использования имеющихся экскаваторов путем повышения надежности работы редукторов.

Наиболее полное использование индивидуальных возможностей горных машин и оборудования и обеспечение на этой основе повышения их надежности может быть осуществлено за счет внедрения в технологический процесс технического обслуживания и ремонта дополнительной техноло-

гической операции — диагностирования технического состояния редукторов экскаваторов по фактическому состоянию.

Диагностирование фактического технического состояния редукторов предполагает осуществление постоянного контроля за ним и проведение его технического обслуживания вовремя, не допуская возможности выхода его параметров за допустимые пределы.

Диагностирование фактического состояния редуктора может быть осуществлено с помощью различных методов, в том числе: тепловых, проверки плотности рабочих объемов, виброакустических, физико-химического анализа отработавших эксплуатационных материалов и других.

Выбор того или иного метода диагностирования технического состояния агрегата обусловлен следующими условиями: контролепригодностью оборудования; наличием необходимой приборной базы; наличием методики определения технического состояния по тем или иным диагностическим параметрам и прогнозирования его изменения; наличием обученного и аттестованного персонала; экономической целесообразностью.

Реализация системы проведения технического обслуживания (ТО) по фактическому состоянию требует пол-

ной диагностики объекта, причем желательно обнаруживать все дефекты, влияющие на ресурс, задолго до отказа, чтобы подготовиться к ремонту. В механике и электромеханике, как показывает российская и мировая практика применения данной системы ТО, эффективная диагностика подавляющего числа машин и агрегатов невозможна без проведения виброакустического мониторинга, так как:

- колебательные силы возникают непосредственно в месте появления дефекта, а машина «прозрачна» для вибрации;
- вибрация содержит максимальный объем диагностической информации;
- диагностировать можно на месте, без разборки и остановки оборудования (функциональная диагностика);
- применение системы виброакустического мониторинга позволяет с минимальными материальными затратами и в короткие сроки проводить диагностирование редукторов экскаваторов.

Однократное измерение уровня вибрации позволяет с достаточной точностью определять фактическое техническое состояние объекта и проводить прогнозирование остаточного ресурса.

Успех любой системы вибромониторинга в основном зависит от методов оценки состояния агрегата, то есть способов определения допустимых значений (норм) вибрации и параметров анализа вибрации, интегрированных в анализирующее программное обеспечение пользователя. Главные алгоритмы оценки состояния оборудования продаваемого на рынке программного обеспечения распознают техническое состояние по общему уровню вибрации при широкополосном измерении

Показатели	Год эксплуатации									
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
Эксплуатационная надежность экскаваторного звена по коэффициенту готовности	0,789	0,741	0,734	0,730	0,737	0,725	0,689	0,685	0,594	0,532
Эксплуатационная надежность комплекса оборудования	0,618	0,581	0,571	0,562	0,550	0,550	0,525	0,538	0,451	0,402
Среднегодовая производительность комплекса оборудования, %	100	95,1	92,0	91,5	90,2	88,3	84,5	84,0	72,9	63,2

Таблица 2. Изменение надежности и производительности экскаваторов в зависимости от срока службы

Наименование оборудования	Группа	Класс оценок (Ve) мм/с			
		хорошо	удовлетворительно	допустимо	недопустимо
ЭКГ-4.6, ЭКГ-5А					
Машинный агрегат	2	1,8	1,8...4,5	4,5...11	>11
Подъемный механизм	1	<1,1	1,1...2,8	2,8...7,1	>7,1
Напорный механизм	1	<1,1	1,1...2,8	2,8...7,1	>7,1
Механизм поворота	2	1,8	1,8...4,5	4,5...11	>11

Таблица 3. Интервалы и предельные значения интенсивности вибрации механического оборудования экскаваторов



Рисунок 2. Прибор для анализа спектра вибрации и шума SVAN-958

(наиболее употребим), по вибрации в сравнительно узкой полосе частот или по огибающей спектра.

Разработанные международные (VDI 2056, ISO 2372, ISO 3945 и другие) и российские стандарты и нормативно-методические рекомендации на предельные уровни вибрации основаны на допущении, что подобные по мощности, высоте оси вращения, частоте вращения ротора, способам установки, условиям монтажа и эксплуатации агрегаты имеют примерно одинаковые допустимые значения вибрации при достижении предельного состояния.

По классификации ISO 2372 оценки соответствуют следующему техническому состоянию (таблица 3):

- хорошо — сборка узлов машинного агрегата оптимальна, вероятность появления дефектов на протяжении длительной эксплуатации минимальна;
- удовлетворительно — сборка узлов обеспечивает минимальную вероятность появления эксплуатационных дефектов на протяжении межремонтного пробега;
- допустимо — повышенная вероятность преждевременного выхода узла из строя, машинный агрегат требует ремонта, повышенный уровень механических колебаний должен быть устранен;
- недопустимо — дальнейшая эксплуатация может привести к аварийному отказу машинного агрегата;
- допустимо после ремонта (вводится в отечественных стандартах) — предельное значение интенсивности вибрации при приемочных испытаниях после ремонта.

В процессе проведения эксперимента был использован прибор для анализа спектра вибрации и шума SVAN-958, представленный на рисунке 2.

Назначения SVAN-958:

- измерение и анализ шума и вибрации в соответствии с ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ «Вибрационная безопасность», СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий»;
- измерение виброакустических характеристик машин и механизмов, диагностики технического состояния оборудования и измерений в научных и исследовательских целях.

При помощи прибора-анализатора были произведены измерения вибрации и шума поворотного и подъемного редукторов экскаватора ЭКГ-5А.

Проведенные исследования позволили собрать экспериментальные данные, представленные в таблицах 4-5.

Поскольку зависимости, представленные в логарифмических координатах, наилучшим образом аппроксимируются линейной зависимостью, то для лучшей наглядности и для упрощения расчетов при определении остаточного ресурса редукторов экскаваторно-автомобильных комплексов значения уровней вибрации и шума

в редукторах целесообразно представлять в логарифмической шкале — децибелах.

Формула для перевода звукового давления в децибелы имеет следующий вид:

$$SPL = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

где: SPL (SoundPressureLevel) — уровень звукового давления в децибелах;

P — величина звукового давления в линейных единицах, Па;

$P_0 = 20$  мк Па (нижний порог слышимости человеческого уха) — опорный уровень звукового давления в акустике по международному общепризнанному стандарту, служащий для перевода звукового давления, представленного в линейных единицах (Па), в логарифмическую шкалу — децибелы.

Формула для перевода виброскорости в децибелы имеет следующий вид:

$$Lv = 20 \log\left(\frac{Lv}{Lv_0}\right) \quad (2)$$

№	T, мото-часы	Ve, мм/с	P, Па	Оценка технического состояния
1	1568	0,6	0,011	хорошо
2	2654	0,4	0,013	хорошо
3	3164	0,7	0,016	хорошо
4	5672	1,3	0,022	хорошо
5	7142	0,8	0,018	удовлетворительно
6	7312	0,8	0,028	удовлетворительно
7	7342	0,9	0,032	удовлетворительно
8	7641	1,0	0,022	удовлетворительно
9	10384	2,2	0,025	удовлетворительно
10	10386	1,8	0,045	удовлетворительно
11	13779	2,8	0,112	удовлетворительно
12	17985	7,9	0,112	допустимо
13	18956	4,0	0,252	допустимо
14	19164	7,1	0,200	допустимо
15	19645	6,3	0,283	допустимо
16	20654	4,5	0,178	допустимо
17	21623	4,0	0,224	допустимо
18	21747	6,3	0,159	допустимо
19	22749	7,9	0,356	недопустимо
20	23700	7,9	0,317	недопустимо

Таблица 4. Рабочие параметры и оценка технического состояния редуктора подъема экскаватора ЭКГ-5А

№	Наработка, м-ч	$V_e$ , мм/с	$P$ , Па	Оценка технического состояния
1	2236	0,4	0,013	хорошо
2	5386	0,9	0,022	хорошо
3	5421	1,1	0,022	хорошо
4	6348	0,8	0,040	хорошо
5	6983	1,1	0,050	хорошо
6	7381	0,6	0,028	хорошо
7	9641	3,2	0,036	хорошо
8	10542	2,0	0,056	хорошо
9	11235	1,8	0,112	удовлетворительно
10	11294	2,0	0,142	удовлетворительно
11	13896	4,0	0,126	удовлетворительно
12	17361	8,9	0,224	допустимо
13	17465	5,6	0,252	допустимо
14	19286	4,0	0,356	допустимо
15	19745	6,3	0,502	допустимо
16	20354	5,6	0,564	допустимо
17	20563	10,0	0,564	допустимо
18	20564	10,0	0,564	допустимо
19	21568	12,6	0,710	недопустимо
20	21698	14,1	0,796	недопустимо

Таблица 5. Рабочие параметры и оценка технического состояния редуктора поворота экскаватора ЭКГ-5А

где:  $L_v$  (levelvelocity) — уровень виброскорости в децибелах;

$V$  — значение виброскорости в линейных единицах, м/с;

$V_0$  — опорный уровень виброскорости, служит для перевода виброскорости, представленной в линейных единицах (м/с) в логарифмическую шкалу — децибелы:

$V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с — опорный уровень вибрации в соответствии с российским стандартом.

Значения уровней вибрации и шума редукторов экскаваторов в логарифмических единицах (децибелах) представлены в таблицах 6-7.

Далее докажем, что между уровнем виброскорости  $L_v$  и наработкой  $T$  в редукторе подъема существует взаимосвязь. Для этого аппроксимируем экспериментальные данные линейной функциональной зависимостью.

Для данного закона принимаем линейную зависимость вида:

$$L_v = a + bT \quad (3)$$

Для расчета коэффициентов  $a$  и  $b$  составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} a + bT_1 = L_{v1} \\ a + b\sum_{i=1}^{20} T_i = \sum_{i=1}^{20} L_{vi} \end{cases} \quad (4)$$

В систему уравнений (4) подставляем полученные численные значения:

$$\begin{cases} a + 1,57b = 81 \\ a + 13,16b = 93 \end{cases}$$

Решив систему уравнений, получаем значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} a &= 79,41 \\ b &= 1,05 \end{aligned}$$

Подстановкой найденных коэффициентов в уравнение

(3) получаем линейную функциональную зависимость (математическую модель):

$$L_v = 79,41 + 1,05T \quad (5)$$

На рисунке 3 представлен график реализации линейной функциональной зависимости уровня виброскорости от наработки  $L_v = 79,41 + 1,05T$

Докажем, что между уровнем звукового давления SPL и наработкой  $T$  в редукторе подъема существует взаимосвязь. Для этого аппроксимируем экспериментальные

№	$T$ , мото-часы	$L_v$ , дБ	SPL, дБ	Оценка технического состояния
1	1568	82	55	хорошо
2	2654	79	56	хорошо
3	3164	83	58	хорошо
4	5672	88	61	хорошо
5	7142	84	59	удовлетворительно
6	7312	84	63	удовлетворительно
7	7342	85	64	удовлетворительно
8	7641	86	61	удовлетворительно
9	10384	93	62	удовлетворительно
10	10386	91	67	удовлетворительно
11	13779	95	75	удовлетворительно
12	17985	104	75	допустимо
13	18956	98	82	допустимо
14	19164	103	80	допустимо
15	19645	102	83	допустимо
16	20654	99	79	допустимо
17	21623	98	81	допустимо
18	21747	102	78	допустимо
19	22749	104	85	недопустимо
20	23700	104	84	недопустимо

Таблица 6. Рабочие параметры и оценка технического состояния редуктора подъема экскаватора ЭКГ-5А, представленные в логарифмических единицах (децибелах)

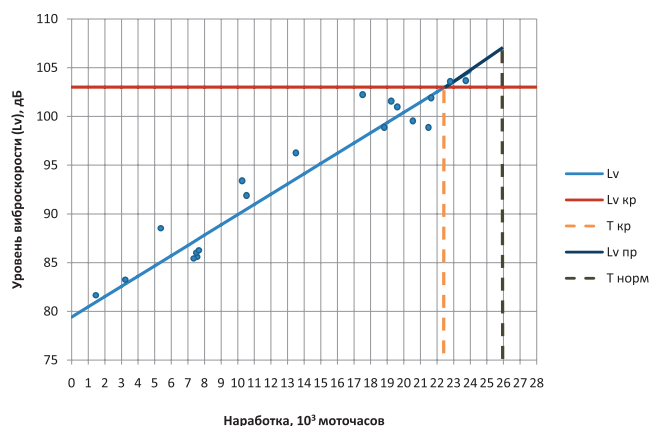


Рисунок 3. График реализации линейной функциональной зависимости уровня виброскорости от наработки  $L_v = 79,41 + 1,05T$  в редукторе подъема экскаватора ЭКГ-5А

данные линейной функциональной зависимостью. Для данного закона принимаем линейную зависимость вида:

$$SPL = a + bT \quad (6)$$

Для расчета коэффициентов  $a$  и  $b$  составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} a + bT_1 = SPL_1 \\ a + b\sum_{i=1}^{20} T_i = \sum_{i=1}^{20} SPL_i \end{cases} \quad (7)$$

В систему уравнений (7) подставляем полученные численные значения:

$$\begin{cases} a + 1,57b = 54 \\ a + 13,16b = 71 \end{cases}$$

Решив систему уравнений, получаем значения коэффициентов:

$$a = 51,32 \quad b = 1,46$$

Подстановкой найденных коэффициентов в уравнение (6) получаем линейную функциональную зависимость (математическую модель):

$$SPL = 51,32 + 1,46T \quad (8)$$

На рисунке 4 представлен график реализации линейной функциональной зависимости уровня звукового давления от наработки  $SPL = 51,32 + 1,46T$ .

На рисунке 5 изображен график реализации установленных функциональных зависимостей, описывающих рабочие параметры редуктора подъема экскаватора ЭКГ-5А.

Используя установленные функциональные зависимости звукового давления и виброскорости от наработки, рассчитаем критическую величину звукового давления, соответствующего аварийному состоянию редуктора подъема экскаватора ЭКГ-5А:

$$SPL_{кр} = 51,32 + 1,46 * 22,47 = 84,12 \text{ дБ} \quad (9)$$

Таким образом, состояние редуктора подъема можно

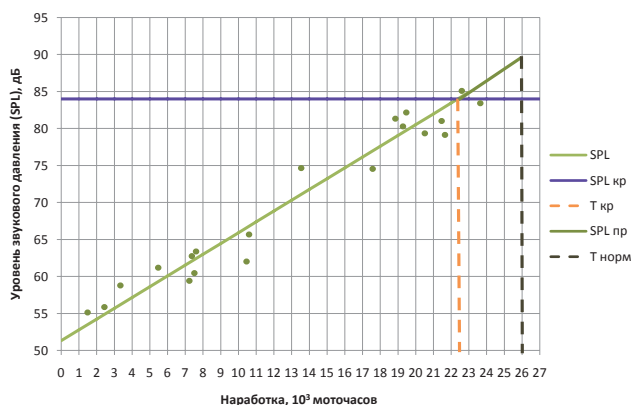


Рисунок 4. График реализации линейной функциональной зависимости уровня звукового давления от наработки  $SPL = 51,32 + 1,46T$  в редукторе подъема экскаватора ЭКГ-5А

считать аварийным при достижении  $L_v=103$  дБ ( $V_e=7,1$  мм/с ISO 2372) или  $SPL=84,12$  дБ ( $P=0,321$  Па).

Далее проводились расчеты аналогично расчетам по данным состояния подъемного редуктора. Было установлено, что состояние редуктора подъема можно считать аварийным при достижении  $L_v=107$  дБ ( $V_e=11,2$  мм/с ISO 2372) или  $SPL=88,7$  дБ ( $P=0,545$  Па).

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что периодический мониторинг по шуму и вибрации может быть использован как основа технического обслуживания по фактическому техническому состоянию. Он нацелен на то, чтобы при минимальных затратах дать возможность персоналу предприятия распознать техническое состояние и точно диагностировать возможные неисправности в редукторах экскаваторов во избежание отказов или внеплановых остановок техники, приводящих к простоям и дорогостоящему ремонту. Диагностика по шуму и вибрации является эффективным методом снижения вероятности внеплановых остановок или отказов.

№	T, моточасы	Lv, дБ	SLP, дБ	Оценка технического состояния
1	2236	78	56	хорошо
2	5386	85	61	хорошо
3	5421	87	61	хорошо
4	6348	84	66	хорошо
5	6983	87	68	хорошо
6	7381	82	63	хорошо
7	9641	96	65	хорошо
8	10542	92	69	хорошо
9	11235	91	75	удовлетворительно
10	11294	92	77	удовлетворительно
11	13896	98	76	удовлетворительно
12	17361	105	81	допустимо
13	17465	101	82	допустимо
14	19286	98	85	допустимо
15	19745	102	88	допустимо
16	20354	101	89	допустимо
17	20563	106	89	допустимо
18	20564	106	89	допустимо
19	21568	108	91	недопустимо
20	21698	109	92	недопустимо

Таблица 7. Рабочие параметры и оценка технического состояния редуктора поворота экскаватора ЭКГ-5А, представленные в логарифмических единицах (децибелах)

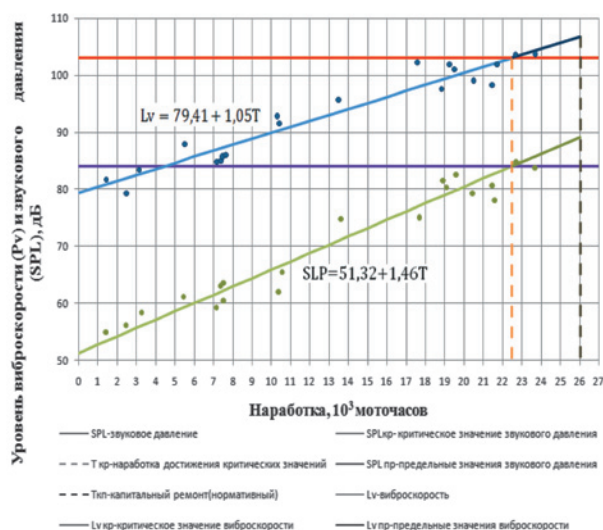


Рисунок 5. График реализации установленных функциональных зависимостей виброскорости от наработки  $L_v = 79,41 + 1,05T$  звукового давления от наработки  $SPL = 51,32 + 1,46T$  в редукторе подъема экскаватора ЭКГ-5А