

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-24-29

УДК 622.24

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА УГЛУБКИ СКВАЖИНЫ  
ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ****ANALYTICAL STUDY OF THE MECHANISM OF WELL DEEPENING IN DIA-  
MOND DRILLING****Гореликов Владимир Георгиевич<sup>1</sup>,**

доктор техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: Kaf\_mech11@mail.ru

**Gorelikov Vladimir G.<sup>1</sup>, D. Sc., Senior researcher****Насонов Михаил Юрьевич<sup>1</sup>,**

доктор техн. наук, доцент, e-mail: Kaf\_mech11@mail.ru

**Nasonov Mikhail Yu.<sup>1</sup>, D. Sc., Associate Professor****Протасов Сергей Иванович<sup>2</sup>,**

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: psi.rmpio@kuzstu.ru, firma@kuzbass-niiogr.ru

**Protasov Sergey I.<sup>2</sup>, C. Sc. (Engineering), Associate Professor****Баатархуу Гантулга<sup>1</sup>,**

аспирант, e-mail: Gantulgab6@gmail.com

**Gantulga Baatarkhuu<sup>1</sup>, postgraduate**<sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет, д. 2, 21 линия В.О., г. Санкт-Петербург, 199026, Россия.<sup>1</sup>Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 2, 21st line Vasilievsky island, 199026, Russian Federation.<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет, д. 28, ул. Весенняя, г. Кемерово, 650000, Россия.<sup>2</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation.

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию механизма углубки скважины при алмазном бурении. Нормальное протекание процесса углубки связывается с соответствием объема разрушаемой горной породы объему межконтактного пространства пары «алмазная коронка – забой скважины», который в свою очередь зависит от числа алмазов, находящихся в контакте с забоем. На базе рассмотренных схем контакта алмазов с забоем скважины анализируется механизм углубки скважины за 1 об. коронки. При анализе углубок за 1 об. отмечается существенное колебание их значений. Так даже при бурении в стендовых условиях по одной и той же горной породе при неизменных параметрах режима бурения для одного и того же типа и диаметра коронок углубка за 1 об. колеблется от 0,1 до 0,6 мм. Кроме того, при принятых схемах углубки скважины, необходимо соблюдать условие, при котором коронка находится в постоянном контакте с забоем, а на всех линиях резания в контакте с горной породой находится одинаковое число алмазов. Практически, как показывает ряд исследований, это маловероятно. В связи с этим необходимо проведение дополнительных исследований по уточнению механизма контактирования коронки с забоем скважины и гипотезы о соответствии объемов межконтактного пространства пары «коронка – горная порода» объему разрушенной горной породы за 1 об. при бурении в породах различной твердости.

**Abstract.** This paper presents the study of the mechanism of well deepening in diamond drilling. Normal development of the process of well deepening is associated with the conformance of the volume of the broken rock with the volume of the intercontact space of the pair “diamond bit – downhole”, that in its turn depends on the number of diamonds which are in contact with the downhole. The mechanism of the well deepening per 1 revolution of the bit is analysed on the basis of the considered schemes of diamonds' contact with the downhole. The analysis of well deepening per 1 revolution showed considerable variation of values. So even when drilling in the conditions of a test bench in one and the same rock, with the constant parameters of the drilling regime for one and the same type and diameter of the bit, the well deepening varies per 1 revolution from 0.1 to 0.6 mm. Also, with the accepted schemes of the well deepening, it is necessary to meet the condition according to which

*the bit is in constant contact with the downhole and on all cutting lines in contact with the rock there is the same number of diamonds. In fact, as shown by a number of studies, this is unlikely. In this connection, it is necessary to conduct additional studies to clarify the mechanism of the drill bit contacting with the downhole and the hypothesis about correlation of the volume of the intercontact space of the pair "diamond bit – downhole" to the volume of broken rock per 1 revolution of drilling in rocks of different hardness.*

**Ключевые слова:** алмазная коронка, забой скважины, бурение, методы расчета, число алмазов, углубка за 1 об.

**Keywords:** Diamond bit, downhole, drilling, calculation methods, the number of diamonds, deepening per 1 revolution

Механизм углубки скважины при алмазном бурении тесно связывается с количеством алмазом, участвующих в разрушении горной породы. Классификация методов расчета количества алмазов контактирующих с забоем скважины приведена в работе [1]. В данной классификации задействованы два основных принципа, в соответствии с которыми выделяются группа теоретических (расчетных) и группа эмпирических (практических) методов. В свою очередь, в группе расчетных методов выделены подгруппы, в основе которых лежит методика расчетов с использованием как детерминированных, так и вероятностных методов. Как правило, в теоретических методах расчетным путем определяется число алмазов, гипотетически участвующих в разрушении горной породы.

При эмпирических методах определяется число алмазов, находящихся в контакте с поверхностью забоя скважины. Среди эмпирических методов выделены лабораторные и стендовые. При лабораторных методах определяется число алмазов, находящихся в контакте с плоскостью, имитирующей забой скважины. В стендовых методах исследование числа контактирующих алмазов осуществляется непосредственно при бурении блоков (например, блоков стекла), имитирующих горную породу. Наиболее широко при исследованиях числа алмазов, контактирующих с забоем скважины в процессе бурения, применяются детерминированные методы.

На базе рассмотренных схем контактирования алмазов с забоем скважины строится механизм ее углубки за 1 оборот коронки, в основу которого положена гипотеза «винтовой» углубки. Ее основные положения применительно к алмазному бурению заключается в следующем:

– разрушение горной породы по всей поверхности забоя и формирование забоя происходит за один оборот коронки;

– углубка коронки за один оборот определяется из выражения:

$$h = h_a N_A = \frac{V_{\text{мех}}}{n}, \quad (1)$$

где  $h_a$  – углубка одного алмаза;  $N_A$  – число алмазов, контактирующих с забоем скважины по линии резания;  $V_{\text{мех}}$  – механическая скорость бу-

рения;  $n$  – частота вращения бурового снаряда.

Углубка по такой схеме показана на рис. 1. Механизм углубки за 1 об. представляет при этом винтовое движение, когда алмазы все время контактируют с новыми слоями горной породы. Согласно этой схеме коронка движется по винтовой поверхности, причем каждый резец снимает слой породы определенной толщины. Длина пути  $z$  каждого резца, пройденного за 1 об. определяется из выражения вида

$$z = \frac{\pi(R + r)}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

где  $R, r$  – наружный и внутренний радиусы коронки по резцам;  $\alpha$  – угол наклона винтовой линии.

Так как значения угла  $\alpha$  очень малы, для практических расчетов принимается

$$z \approx \pi(R + r). \quad (3)$$

В то же время следует отметить, условие (3) исключает вертикальную составляющую винтового движения коронки, что не соответствует физическому смыслу механизма углубки скважины.

По данным зарубежных исследований, рациональная углубка за 1 об. при бурении в твердых горных породах составляет 0,07-0,09 мм, а при бурении в породах средней твердости – до 0,11-0,14 мм. Применительно к буровым станкам с винтовой подачей (фирма «Бойлз Бразес Дрилл») углубка за 1 об. для однослойных коронок составляет 0,05-0,07 мм. Если углубка меньше этих значений, возникает заполирование алмазов, а при больших её значениях имеет место прижог алмазной коронки. В ряде отечественных исследований принята аналогичная схема. Всесторонние исследования углубки за 1 об. выполнены в работе [2].

При анализе углубок за 1 об. отмечается существенное колебание их значений. Так, например, даже при бурении в стендовых условиях по одной и той же породе (VIII категория по буримости) при неизменных параметрах режима бурения для одного и того же типа и диаметра коронок углубка за 1 оборот колеблется от 0,1 до 0,6 мм. Углубка в стендовых условиях больше, чем при бурении в натурных условиях (в скважине). Углубка за 1 об. для алмазных импрегнированных коронок колеблется от 0,01 до 0,11 мм; для однослойных – от 0,01 до 0,16 мм. Наложение на алмазные коронки высокочастотных колебаний вызывает увеличение углубки за 1 об. на 30-40%. В

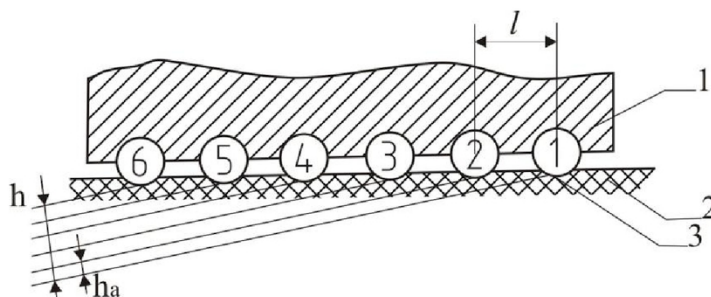


Рис. 1. Схема «винтовой» углубки забоя скважины за 1 оборот алмазной коронки:  
1 – матрица; 2 – горная порода; 3 – алмазы; 1...6 – порядковые номера алмазов;  
 $h_a$  – углубка за 1 об. одного алмаза;  $h$  – суммарная углубка за 1 об.

Fig. 1. The scheme of 'spiral' well deepening per revolution of the diamond bit

Таблица 1. Рекомендуемая углубка за 1 об. коронки (по М.Г. Глазову, ПГО «Центказгеология»)  
Table 1. The recommended well deepening per revolution (by M.G. Glazov, PGO «Tsentskazgeologiya»)

Параметры объемных алмазов		Рекомендуемая углубка за 1 об., мм
зернистость, шт./кар	средний диаметр зерна, мм	
40-30	1,80	0,180
60-40	1,55	0,155
90-60	1,43	0,143
150-90	1,13	0,113

этом случае механизм увеличения объясняется лучшим внедрением алмазов в горную породу под действием динамических нагрузок, а также улучшением условий охлаждения алмазов, поскольку имеет место увеличение ширины бороздок разрушения, образуемых алмазами. Расход алмазов сокращается в 1,3-1,5 раза. На основе анализа данных углубки за 1 об. по результатам бурения в породах различной твердости, установлены следующие средние значения углубки для однослойных коронок:

- породы VII-IX категорий по буримости ... 0,09-0,11 мм;
- породы X и XI категорий по буримости ... 0,055-0,048 мм.

Применительно к производственным условиям гипотеза углубки за 1 об. детально исследована к.т.н. Глазовым М.Г. [3]. Оптимальная величина углубка для однослойных и импрегнированных коронок принимается равной  $0,1d$  ( $d$  – средний диаметр алмаза) (табл. 1).

Исходя из этого условия, определены оптимальные значения углубок за один оборот для диапазона частот вращения от 87 до 780 мин<sup>-1</sup>. Основопологающим принимается условие, что бурение при углубке за 1 об. менее 0,02 мм приводит к заполированию алмазов, а при углубке более 0,09 мм вызывает прижог алмазных коронок. Для поддержания оптимальной углубки в течение рейса рекомендуется формула

$$P_{Ti+1} = P_O \cdot \frac{h_{зад}}{h_{тек i}}, \quad (4)$$

где  $P_O$  – минимальная нагрузка, обеспечивающая

заданную углубку  $h_{зад}$  в начале рейса;  $P_{Ti+1}$

– текущее значение нагрузки;  $h_{тек i}$  – текущее значение углубки в конце интервала регулирования.

Повышение текущих нагрузок на коронку при бурении монолитных горных пород допускается до 4000 даН. При этом, соответственно фактической механической скорости бурения, увеличивается (или уменьшается) расход очистного агента. Для устранения самозаклинивания керна предлагается кратковременное (на 1-5 сек) снижение нагрузки на коронку до 100-200 даН. Если в течение 2-3 попыток самозаклинивание керна не устраняется, бурение прекращается. Управление нагрузкой на коронку должно вестись через каждые 1-5 мин. Увеличение интервала регулирования вызывает нарушение связи механической скорости бурения с нагрузкой. Основанием для повышения нагрузки на коронку служит только снижение механической скорости бурения.

Дальнейшее развитие, в частности для высоких частот вращения коронки (до 2000 мин<sup>-1</sup>), рассматриваемая схема углубки получила в работах ВИТРа [4].

Для определения граничных условий углубки за 1 об. в случае единичного контакта «алмаз – горная порода» предложена формула вида

$$\frac{r}{4} - \left( \frac{r^2}{16} - \frac{\mu F_H}{\pi \sigma} \right)^{0,5} < h < \frac{r}{4} \quad (5)$$

где  $r$  – радиус алмазного зерна;  $\mu$  – коэффициент сопротивления движению алмазного зерна;  $F_H$  – нормальная нагрузка на единичное алмазное зерно.

Таблица 2. Рекомендуемая углубка за 1 оборот (по данным ВИТР)  
Table 2. The recommended well deepening per revolution (by VITR)

Категория горных пород по буримости	Параметры объемных алмазов		Рекомендуемая углубка за 1 об., мм	
	Зернистость, шт./кар	Средний диаметр зерна, мм	Минимальная $h_{\min}$	Максимальная $h_{\max}$
VII-VIII	20-12	1,95	0,034	0,39
	30-20	1,70	0,026	0,34
IX	50-30	1,50	0,020	0,33
	60-40	1,35	0,018	0,29
X	120-90	1,05	0,017	0,09
XI	150-120	0,95	0,015	0,08
XII	400-120	0,66	0,015	0,07

но;  $\sigma$  – предел текучести горной породы.

Расчетные минимальные и максимальные значения углубки за 1 об. приведены в табл. 2. Бурение с углубкой за 1 об. ниже минимальных значений приводит к заполированию алмазов, а бурение с углубкой за 1 об. выше рекомендуемых максимальных значений вызывает прижог алмазных коронок.

Следует отметить, что в указанных расчетах используется значение предела текучести  $\sigma$ , которое характерно для металлов. Для горных пород хрупких, упругих и даже упруго-пластичных, как правило, предел текучести не выделяют.

С учетом последнего замечания д.т.н. Горшковым Л.К. для расчета граничных значений углубки за 1 об. предложены уточненные формулы [5].

Для минимальной углубки

$$h_{\min} = 0,25 \left[ r - \left( \frac{r^2 P_{III} - 2F_{\min}}{P_{III}} \right)^{0,5} \right] \quad (6)$$

где  $P_{III}$  – твердость по штампу;  $r$  – радиус алмазного зерна;  $F_{\min}$  – минимальное значение

нагрузки, обеспечивающее преодоление упругих деформаций и переход к необратимым, разрушающим деформациям породы.

Для максимальной углубки

$$h_{\max} = 4,3 \cdot 10^{-2} \rho^{1/3} \left[ \frac{a(D_H^2 - D_B^2)(1 - z_p r)}{(a-1)z_p D_{CP}^2 b^2} \right]^{2/3} \quad (7)$$

где  $\rho$  – радиус округления внедрившейся в породу части алмазного зерна;  $a$  – отношение длины средней окружности матрицы  $D_{CP}$  коронки к суммарной длине промывочных каналов;  $D_H$  и  $D_B$  – наружный и внутренний диаметры матрицы коронки;  $z_p$  – число режущих алмазов на торце матрицы;  $b$  – ширина торца матрицы коронки.

Допустимые значения углубки  $h$  выбираются из условия:

$$h_{\min} < h < h_{\max} \quad (8)$$

На основе формул (6-7) определены рекомендуемые глубины внедрения алмазов в породу за-

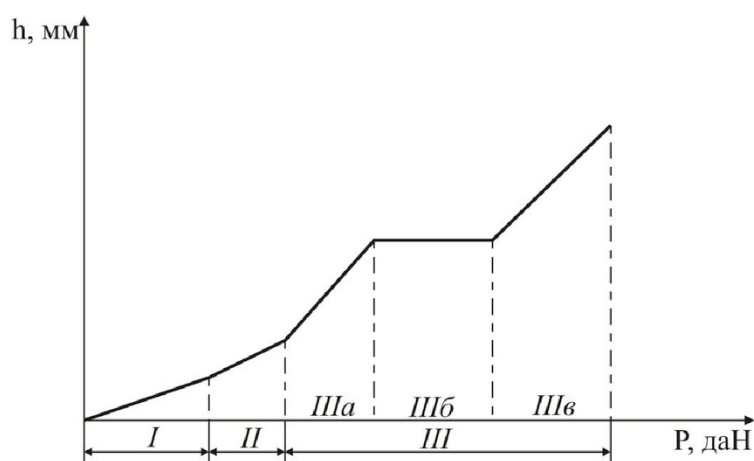


Рис. 2. Зависимость углубки  $h$  за 1 об. от осевой нагрузки  $P$   
I, II, III – зоны усталостного, поверхностного и объемного разрушения; IIIa, IIIб, IIIв – участки зоны объемного разрушения, соответствующие заполированию алмазов, повышенному их износу и прижогу коронок.

Fig. 2. Dependence of well deepening  $h$  per revolution on axial load  $P$



боя скважины для коронок диаметром 59 мм различных типов (табл. 3).

В работе [6], принято, что оптимальная величина внедрения коронки за 1 об. для однотипного породоразрушающего инструмента есть величина постоянная на всем диапазоне частот вращения. Эта величина прямо пропорциональна линейному размеру зерна объемных алмазов и обратно пропорциональна их зернистости. Принято также, что абсолютное значение углубки за 1 об. зависит только от нагрузки на коронку, а объемное разрушение горной породы – от величины углубки. В зависимости от этого выделяются три зоны разрушения (рис. 2):

I – зона поверхностного разрушения;

II – зона усталостного разрушения;

III – зона объемного разрушения.

В зоне III выделяется три участка объемного разрушения; на участке IIIа имеет место неэффективное объемное разрушение, при котором из-за недостаточной нагрузки возникает заполирование; на участке IIIб из-за большой нагрузки имеет место повышенный износ алмазной коронки; эффективным является участок IIIв объемного разрушения, где алмазная коронка работает в режиме между заполированием и повышенным износом. Для этого участка характерно постоянное значение механической скорости бурения в зависимости от нагрузки на коронку.

Экспериментальные исследования механизма углубки скважины как нестационарного процесса описаны в работе [7]. Анализ работы алмазной коронки показал, что кинематика её движения является достаточно сложной, связана с режимом работы бурильной колонны и характеризуется:

- степенью разработки ствола скважины;
- наличием поперечных перемещений коронки относительно забоя;
- вертикальными колебаниями коронки вплоть до её отрыва от забоя.

В зависимости от параметров режима бурения для пары «коронка – порода» выделены три режима работы алмазной коронки:

- 1) режим равномерного вращения;
- 2) режим крутильных автоколебаний 2-го рода;
- 3) режим крутильных автоколебаний 1-го рода (при этом режиме возможно прекращение вращения коронки).

При наличии третьего режима работы алмазной коронки накопление шлама под её секторами приводит к перемещению коронки в вертикальном направлении. В это время шлам перемещается в промывочный канал и коронка опять входит в рабочий режим. Изменение режима работы коронки определяется степенью сближения матрицы с забоем. Существует определенное значение углубки за 1 об. при котором происходит изменение режима работы коронки. Одной из причин нестандарт-

ности забойных процессов является также неравномерность распределения осевой нагрузки между секторами коронки.

На основе выполненного анализа можно отметить.

1. Параметр углубки за 1 об. коронки, предлагают рассматривать как показатель физических процессов, протекающих на забое. Первоначально же критерий углубки за 1 об. рассматривался как условный показатель, численно равный произведению числа алмазов, находящихся на средней окружности коронки, на величину углубки одного алмаза. Однако в матрице алмазных коронок на окружностях разных диаметров, как правило, неодинаковое число алмазов. Например, у коронок типа А4ДП на первой окружности (первой линии резания, начиная от внутреннего диаметра) имеется 24 алмаза, на второй – 28 алмазов, то есть общая углубка алмазов на первой линии должна составлять  $24 h_a$ , а углубка алмазов на второй линии резания –  $28 h_a$ . Таким образом, чтобы использовать формулу (1) для объяснения процесса формирования забоя скважины и других физических забойных процессов, необходимо соблюдать условие, при котором коронка находится в постоянном контакте с забоем, а на всех линиях резания в контакте с горной породой находится одинаковое число алмазов. Практически, как показывает ряд исследований это маловероятно.

2. Неправомочно и величину оптимальной углубки алмаза связывать с объемом образующегося шлама, который должен соответствовать объему пространства торца матрицы коронки. Исходя из этого допущения, углубка должна быть одинакова для пород различной твердости. Но из анализа видно, что оптимальное значение углубки алмазов для нетвердых пород составляет  $0,25d$ , для трещиноватых –  $0,15d$ , для твердых –  $0,10d$  ( $d$  – диаметр алмазного зерна, мм).

3. Следует отметить, что, если по формуле (1) определять углубку для коронок диаметром 46 и 76 мм, то углубка за 1 об. независимо от площади кольцевого забоя, окажется минимальной для коронок диаметром 46 мм и максимальной – для коронок диаметром 76 мм. В практике же высокие скорости бурения обеспечиваются, наоборот, при меньших диаметрах породоразрушающего инструмента, для чего рекомендуемая величина внедрения алмаза (по критикуемой гипотезе) у коронок меньшего диаметра должна быть существенно больше, чем у коронок большего диаметра. Согласно гипотезе о соответствии объема шлама и межзеренного пространства это должно вызывать повышенный износ инструмента малого диаметра, что также в стандартных полевых условиях не наблюдается

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гореликов В. Г. Классификация и анализ методов расчета количества буровых алмазов, участвующих в разрушении горных пород / В. Г. Гореликов, Ю. В. Лыков, Баатархуу Гантулга // Магистрант, докторантын эрдэм шинжилгээний битээлийн эмхэтгэл, 2014. № 9/156, – С. 115 – 117.
2. Кардыш В.Г. Оборудование для поискового бурения. – Л.: Недра, 1989. – 145 с.
3. Алмазосберегающая технология бурения / Г. А. Блинов, В. П. Васильев, М. Г. Глазов [и др.] – Л.: Недра, 1989. – 184с.
4. Блинов Г. А. Исследование механизма циклического формирования забоя скважины при алмазном бурении твердых горных пород / Г. А. Блинов, В. Г. Гореликов // В сб.: Исследование и разработка методов и средств для реализации высокоэффективной ресурсосберегающей технологии геологоразведочного бурения. – Л.: ВИТР, 1990. – С. 67–74.
5. Горшков Л. К. Температурные режимы алмазного бурения / Л.К. Горшков, В.Г. Гореликов. – М.: Недра, 1992. – 173с.
6. Бабишин В. А. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения / В. А. Бабишин, В. А. Глоба, О. Л. Зайонц // Разведка и охрана недр, 1988, № 10. – С. 38–46.
7. Воробьев Г. А. Режимы работы алмазной коронки и их исследование с помощью скоростной киносъемки / Г. А. Воробьев, Б. А. Новожилов, С. А. Варца // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка, 1989, № 9. – С. 123–128.

## REFERENCES

1. Gorelikov V.G. The classification and analysis of the methods of determining the diamond's number involved in the destruction of rock / Yu.V. Lykov, Baatarkhuu Gantulga // The collection of the master and post-graduate student's research, 2014. № 9/156, – pp. 115 – 117.
2. Kardysh V.G. Equipment for exploration drilling. – L.: Nedra, 1989. – p. 145.
3. The diamond-saving technology of drilling / G.A. Blinov, V.P. Vasiliev, M.G. Glazov, et al. – L.: Nedra, 1989. – p.184.
4. Blinov G.A. The study of the cyclical forming mechanism of bottomhole in solid rocks drilling / V.G. Gorelikov // In spb.: The study and development of the method and facility for implementation of high-performance resource-saving technology in exploration drilling. – L.: VITR, 1990. – pp. 67–74.
5. Gorshkov L.K. Temperature regime of diamond drilling / V.G. Gorelikov. – M.: Nedra, 1992. – p.173.
6. Babishin V.A. The resource-saving technology of diamond drilling / V.A. Globa, O.L. Zajonts // Prospecting and prospecting of mineral, 1988, № 10. – pp. 38–46.
7. Vorobyov G.A. Operating modes of diamond bit and its study with the help of high-speed filming // B.A. Novozhilov, S.A. Varetz // Archives Universities. Geology, 1989, № 9. – pp. 123–128.

Поступило в редакцию 11.07.2017

Received 11.07.2017