

Е.Л. Леушева**ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ
ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД***

Рассмотрены способы интенсификации процесса разрушения (ослабление) горных пород для повышения эффективности буровых работ. Предмет исследования – массив горных пород повышенной твердости и влияние на него различных факторов. Цель работы – повышение эффективности разрушения горных пород повышенной твердости при бурении скважин различного назначения. Существуют различные способы ослабления горных пород, основные из которых механические, термические, химические, биологические и технологические. Анализ результатов теоретических исследований позволил сделать выводы, что при разрушении горных пород целесообразнее применять такие поверхностно-активные вещества, которые будут лучше растекаться по поверхности горной породы, т.е. иметь наименьший краевой угол смачивания и низкие значения поверхностного натяжения, это позволит буровому раствору с добавкой в него ПАВ глубже проникать в образовавшиеся микротрещины, создавая расклинивающее давление на их внутреннюю поверхность, что необходимо стремиться к понижению удельного электрического сопротивления буровых растворов и что при выборе бурового раствора необходимо проводить исследования по замеру основных прочностных свойств горных пород (таких как, предел прочности (временного сопротивления), микротвердость, динамическая прочность). Представлена возможность оценки влияния некоторых физических свойств водных растворов поверхностно-активных веществ на изменение физико-механических характеристик твердых горных пород и на этой основе разработать методику количественной оценки разупрочняющего действия промывочной жидкости на буримые горные породы, состоящую из пяти последовательных этапов, включающих определение основных показателей свойств бурового раствора и буримой горной породы. По представленной методике были проведены исследования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследуемые виды анионоактивных ПАВ имеют высокий коэффициент эффективности разрушения горной породы, из них наилучшие результаты получены при использовании 0,1% водного раствора лаурилсульфата натрия.

Ключевые слова. горная порода, ослабление пород, микротрещины, реагенты – детергенты, поверхностно-активные вещества, прочность породы, буровой раствор, адсорбция.

Технические и экономические показатели бурения, в том числе и твердых горных пород во многом зависят от совершенства технологии промывки скважин, состава и свойств буровых растворов, их физико-химической обработки и их соответствия буримым породам.

Следует отметить, что порода высокой твердости мало изменяет свои

механические свойства под влиянием высоких давлений и температур, имеющих место на больших глубинах. Наоборот, осадочные породы невысокой твердости и плотности на больших глубинах под влиянием высоких давлений и температуры уплотняются и твердость их может увеличиться в 3–4 раза, в соответствии с чем изменится и их буримость.

* Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-4410.2015.5.

Известно, что с уменьшением плотности промывочной жидкости повышается механическая скорость проходки. Если заменить глинистый раствор водой, скорость бурения увеличивается на 20–30%. Еще большее увеличение (в 2–5 раз) скорости бурения дает замена промывочной жидкости газом [1]. Это указывает на необходимость исследований в области применения буровых растворов пониженной плотности на основе различных полимеров.

Предварительное ослабление горных пород представляет собой процесс, при котором массив изменяет свои физико-механические свойства в сторону снижения показателей прочности [2]. В работе [3] способы ослабления горных пород с жесткими связями разделяются на пять классов: механические, термические, химические, биологические и технологические.

Уменьшение поверхностной энергии твердого тела экспоненциально уменьшает его долговечность под нагрузкой [4], т.е. снижает его прочность.

Для практического уменьшения величины поверхностного натяжения твердого тела можно использовать внутренний адсорбционный эффект, т.е. адсорбцию ПАВ на внутренних поверхностях раздела зародышевых микротрещинах разрушения.

Важным фактором интенсификации процесса бурения горных пород является воздействие на них ПАВ [5, 6, 7]. Поверхностно-активная среда влияет на характер деформации и разрушения твердых тел, главным образом, в окрестностях острых (тупиковых) концов развивающихся трещин. Таким образом, в областях деформации твердого тела адсорбционное влияние среды проводит к изменению эффективной поверхностной энергии, приходящейся на единицу поверхности, что и обуславливает изменение прочностных свойств твердого тела.

Наибольшие адсорбционные эффекты имеют место тогда, когда возникающие в процессе разрушения новые поверхности успевают покрываться адсорбционными слоями. С этой точки зрения эффективность действия ПАВ при ударно – вращательном и при бурении шарошечными долотами выше, чем при вращательном – коронками и режущими долотами.

Анализ результатов исследований [8], проведенных ранее исследователями в области разрушения горных пород позволило сделать следующие выводы:

- при разрушении горных пород целесообразнее применять такие ПАВ, которые будут лучше растекаться по поверхности, т.е. иметь наименьший краевой угол смачивания и низкие значения поверхностного натяжения, это позволит буровому раствору с добавкой в него ПАВ глубже проникать в образовавшиеся микротрещины, создавая расклинивающее давление на их внутреннюю поверхность;
- для повышения эффективности разрушения породы на забое необходимо стремиться к понижению удельного электрического сопротивления буровых растворов;
- при выборе бурового раствора необходимо проводить исследования по замеру основных прочностных свойств горных пород (например, предела прочности (временного сопротивления), микротвердости, динамической прочности).

Известно [6, 7, 9], что буровые растворы оказывают наибольшее положительное влияние на эффективность разрушения пород на забое скважины через их способность препятствовать смыканию микротрещин, образовавшихся при ударе элементов вооружения долота. Это достигается уменьшением поверхностной энергии на поверхности трещины и снижением угнетающего гидравлического давления на забой скважины.

Снижение поверхностной энергии обеспечивается образованием поверхностного слоя на границе раздела фаз. Мера недокомпенсированности межмолекулярных сил в поверхностном слое, или иначе – избыточную свободную энергию, количественно можно оценить величиной поверхностного натяжения и удельного электрического сопротивления жидкой фазы. Очевидно, что снижение давления на забой можно добиться лишь снижением плотности бурового раствора.

Исходя из вышесказанного, в работе сделана попытка оценки влияния некоторых физических свойств водных растворов ПАВ на изменение физико-механических характеристик пород и на этой основе разработать методику количественной оценки разупрочняющего действия промывочной жидкости на буримые горные породы, состоящую из пяти последовательных этапов, включающих определение основных показателей свойств бурового раствора и буримой горной породы.

Так, понижение прочности горной породы на забое скважины (ΔP_p) можно выразить через функцию следующих физических свойств раствора:

$$\Delta P_p = f(\sigma_{п.н.}, R_p, \rho_p) \quad (1)$$

где $\sigma_{п.н.}$ – поверхностное натяжение раствора, мН/м; R_p – удельное электрическое сопротивление раствора, Ом·м; ρ_p – плотность раствора, г/см³.

Очевидно, что уменьшение этих показателей способствует сохранению микротрещин в породе после снятия нагрузки.

Этап I. Определение плотности раствора, поверхностного натяжения и удельного электрического сопротивления.

Для измерения плотности промывочной жидкости используется ареометр АБР-1, рычажные весы. Поверхностное натяжение замеряется при помощи системы анализа формы кап-

ли «EasyDrop» [10]. Удельное электрическое сопротивление раствора определяется ризистивиметром, который состоит из измерительного блока и измерительной ячейки, в которую заливается исследуемый раствор.

Этап II. Расчет относительных коэффициентов поверхностного натяжения, удельного электрического сопротивления, плотности раствора и интегрального показателя свойств раствора.

Влияние различных ПАВ в составе бурового раствора на физико-механические свойства горных пород можно количественно оценить через интегральный показатель свойств раствора (K_p):

$$K_p = \frac{K_1 + K_2}{2\rho_0} \quad (2)$$

где K_1 – относительное поверхностное натяжение; K_2 – относительное удельное электрическое сопротивление раствора; ρ_0 – относительная плотность бурового раствора.

Так как интегральный показатель является безразмерной величиной, то входящие в него коэффициенты соответственно будут равны:

$$K_1 = \frac{\sigma_{п.н.}^B}{\sigma_{п.н.}^P}; \quad K_2 = \frac{R_B}{R_P}; \quad \rho_0 = \frac{\rho_B}{\rho_P} \quad (3)$$

где $\sigma_{п.н.}^B$, $\sigma_{п.н.}^P$ – поверхностное натяжение воды и исследуемого раствора на поверхности образца; R_B , R_P – удельное электрическое сопротивление воды и исследуемого раствора; ρ_B , ρ_P – плотности воды и исследуемого раствора.

Анализ уравнений (2) и (3) показывает, что с уменьшением поверхностного натяжения раствора $\sigma_{п.н.}^P$ по отношению к поверхностному натяжению воды $\sigma_{п.н.}^B$ значение K_p увеличивается. То же самое можно сказать и об удельном электрическом сопротивлении. Снижение плотности раствора ρ_p приводит к уменьшению относительной

плотности ρ_0 и соответственно, к росту интегрального показателя свойств раствора K_p .

Этап III. Исследование основных физико-механических свойств горной породы.

Временное сопротивление (предел прочности) образца горной породы при одноосном сжатии определяется на прессе Controls. Динамическая прочность определяется методом толчения на приборе ПОК (прибор определения крепости). Измерение твердости по методу Л.А. Шрейнера производится на приборе УМГП-3.

Этап IV. Расчет изменения временного сопротивления, динамической прочности и микротвердости пород и среднего удельного критерия прочности.

Физико-механические свойства буримых горных пород в лабораторных условиях можно оценить при испытании образцов керна на одноосное сжатие, динамическую прочность и микротвердость, как некий удельный критерий прочности ($\sigma_{пр}$):

$$\sigma_{пр} = f(\sigma_n, F_d, P_{тв}) \quad (4)$$

где σ_n – предел прочности (временное сопротивление) породы, МПа; F_d – динамическая прочность породы; $P_{тв}$ – микротвердость породы, 10^6 Н/м².

Тогда средний удельный критерий прочности породы (K_n) можно представить в виде:

$$K_n = \frac{\Delta\sigma_n + \Delta F_d + \Delta P_{тв}}{3} \quad (5)$$

где $\Delta\sigma_n$, ΔF_d , $\Delta P_{тв}$ – относительный предел прочности, относительная динамическая прочность и относительная микротвердость породы:

$$\Delta\sigma_n = \frac{\sigma_n^p}{\sigma_n^b}, \quad \Delta F_d = \frac{F_d^p}{F_d^b}, \quad \Delta P_{тв} = \frac{P_{тв}^p}{P_{тв}^b} \quad (6)$$

где σ_n^p , σ_n^b – предел прочности образца породы в воде и в среде раствора; F_d^p , F_d^b – динамическая прочность об-

разца породы в воде и среде раствора; $P_{тв}^p$, $P_{тв}^b$ – микротвердость образца породы в воде и среде раствора.

Из уравнений (5) и (6) следует, что чем больше снижаются прочностные показатели породы в среде раствора (σ_n^p , F_d^p , $P_{тв}^p$), тем интенсивнее уменьшается удельный критерий прочности породы K_n .

Этап V. Расчет коэффициента эффективности разрушения.

Очевидно, что чем больше значение K_p и меньше K_n , тем эффективнее разрушение породы.

Для формализации полученных результатов расчетов по уравнениям (2) и (5) введем понятие коэффициента эффективности разрушения, которое связывает физические свойства раствора через параметр K_p с физико-механическими характеристиками породы K_n :

$$K_{э.р} = \frac{K_p}{K_n} \quad (7)$$

где $K_{э.р}$ – коэффициент эффективности разрушения

В результате проведения исследований по представленной методике, получаем коэффициент эффективности разрушения, с помощью которого количественно оцениваем, как влияет тот или иной раствор на процесс разрушения горной породы.

Для оценки применимости разработанной методики на практике были проведены исследования влияния анионактивных ПАВ на разрушение горных пород. Использовался линейный алкилбензол натрия, лаурилсульфат натрия и ацетат калия. Образец горной породы представлен диабазом.

Этап I. Плотность исследуемых водных растворов ПАВ равна 1 г/см³, значения поверхностного натяжения представлены на рис. 1, удельное электическое сопротивление в табл. 1.

Этап II. Расчет коэффициентов, необходимых для получения интеграль-

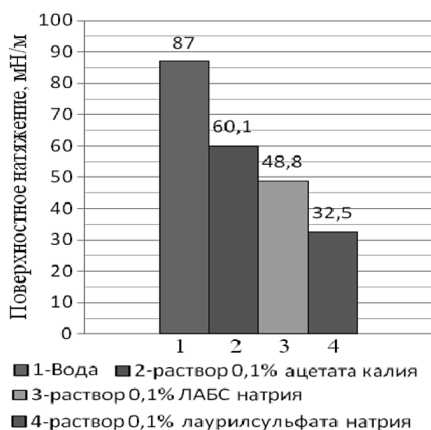


Рис. 1. Значение поверхностного натяжения на границе «раствор-образец породы» для водных растворов анионактивных ПАВ

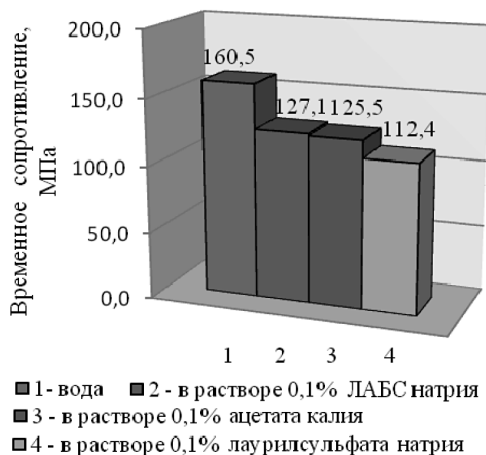


Рис. 2. Зависимость предела прочности горной породы от вида ПАВ

ного показателя свойств раствора и расчет самого показателя приводится в табл. 2.

Этап III. Исследование основных физико-механических свойств горной породы. На рис. 2 и 3 представлены зависимости предела прочности (временного сопротивления) и динамической прочности образца горной породы от вида ПАВ.

Данные об изменении микротвердости представлены в гистограмме на рис. 4.

Этап IV. Расчет относительного предела прочности (временного сопротивления), динамической прочности и микротвердости образца породы и среднего удельного критерия прочности представлен в табл. 3.

Этап V. Расчет коэффициента эффективности разрушения приведен в табл. 4

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые анионактивные ПАВ имеют самый высокий коэффициент эффек-

Таблица 1

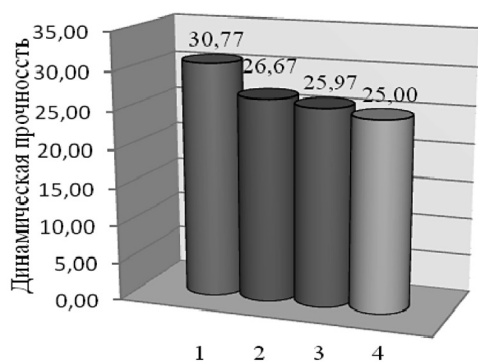
Показатели удельного электрического сопротивления растворов

Вода (водопроводная)	0,1% раствор ацетата калия	0,1% раствор лаурилсульфата натрия	0,1% раствор ЛАБС натрия
107,1	35,3	61,7	80,6

Таблица 2

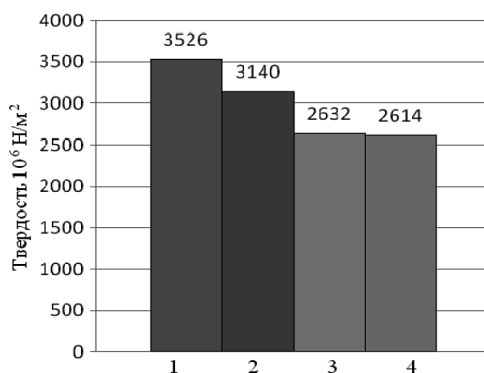
Результаты расчета интегрального показателя свойств раствора

	Вода	0,1% раствор ацетата калия	0,1% раствор лаурилсульфата натрия	0,1% раствор ЛАБС натрия
K_1	1	1,45	2,68	1,78
K_2	1	3,04	1,73	1,33
ρ_0	1	1	1	1
K_p	1	2,245	2,205	1,56



■ 1- вода ■ 2 - с раствором 0,1% ацетата калия
 ■ 3 - с раствором 0,1% ЛАБС натрия
 ■ 4 - с раствором 0,1% лаурилсульфата натрия

Рис. 3. Зависимость динамической прочности горной породы от вида ПАВ



■ 1- сухой образец ■ 2- ЛАБС натрия
 ■ 3- лаурилсульфат натрия ■ 4- ацетат калия

Рис. 4. Гистограмма изменения твердости образца породы в среде водных растворов анионактивных ПАВ

Таблица 3

Результаты расчета среднего удельного критерия прочности

	Вода	0,1% раствор ацетата калия	0,1% раствор лаурилсульфата натрия	0,1% раствор ЛАБС натрия
Изменение предела прочности $\Delta\sigma_n$	1	0,782	0,700	0,792
Изменение динамической прочности ΔF_d	1	0,867	0,812	0,844
Изменение микротвердости ΔP_{tw}	1	0,741	0,746	0,891
Средний удельный критерий прочности K_n	1	0,797	0,753	0,859

Таблица 4

Расчет коэффициента эффективности разрушения

	Вода	0,1% раствор ацетата калия	0,1% раствор лаурилсульфата натрия	0,1% раствор ЛАБС натрия
Интегральный показатель свойств раствора K_p	1	2,245	2,205	1,56
Средний удельный критерий прочности K_n	1	0,797	0,753	0,859
Коэффициент эффективности разрушения $K_{э.р.}$	1	2,82	2,93	1,82

тивности разрушения горной породы, из них наилучшие результаты получе-

ны при использовании 0,1% водного раствора лаурилсульфата натрия.

1. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1994. – 264 с.

2. Синюков Ю.М., Дихтяр А.А., Криворучко А.М., Шматовский Л.Д. Теоретические предпосылки и возможные направления интенсификации процесса разрушения крепких горных пород / Механика и разрушение горных пород. – Киев: Наукова думка. – 1972. вып. 2. – С. 288–296.

3. Калинин А.Г. Бурение нефтяных и газовых скважин (курс лекций). Российский государственный геологоразведочный университет – М.: Изд.ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 848 с.

4. Gill J.A. Hard Rock Drilling Problems Explained by Hard Rock Pressure Plots. Presented at the IADC/SPE Drilling Conference, 20–23 February. 11377-MS. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/11377-MS>.

5. Ребиндер П.А. Шрейнер Л.А., Жигач К.Ф. Понижители твердости в бурении (физико-химический метод облегчения механического разрушения твердых горных пород при бурении). – М.: Изд. АН СССР, 1944. – 199 с.

6. Шоболова Л.П. К оценке эффективности воздействия поверхностно-активных веществ на породу / Физико-технические проблемы добычи и обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд. АН СССР. – 1980. – С. 137–141.

7. Шрейнер Л.А., Жигач К.Ф. Бурение шпуров с промывкой и добавками понизителей твердости. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1943. – С. 7–53.

8. Дихтяр А.А., Криворучко А.М., Синюков Ю.М. Разрушение крепких горных пород с применением поверхностно-активных веществ / Механика и разрушение горных пород, вып. 2. – Киев: Наукова думка, 1972. – С. 283–288.

9. Kawale D. Influence of dynamic surface tension on foams: Application in gas well deliquification: MSc. Thesis / Delft University of Technology of Applied Sciences Department of Multi-Scale Physics, 2012. – 97 p.

10. Система анализа формы капли «Easy Drop». Руководство по применению / KRUSS, GmbH, Hamburg. – 2007. – 147 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Леушева Екатерина Леонидовна – ассистент кафедры,
e-mail: Leusheva.ekaterina@mail.ru,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC 622.244.49

HARD ROCK DRILLING EFFICIENCY

Leusheva E.L., Assistant of Chair, e-mail: Leusheva.ekaterina@mail.ru,
National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

The article focuses on ways of intensifying rock disintegration (weakening) in order to enhance drilling efficiency. The object of the study is and increased strength rock mass and various influences on it. The aim of the study is to increase efficiency of higher strength rock mass disintegration in various purpose drilling. There are many different methods of rock mass weakening, among which the basic procedures are mechanical, thermal, chemical, biological and technological.

Based on the analysis of theoretical research findings, it is concluded that it is advisable to disintegrate rocks using such surface active substances that better spread over rock surface, i.e. have the smallest wetting angle and low surface tension; this will allow drilling mud added with SAS to penetrate deeper in created microcracks and to generate disjoining pressure there. Moreover, it is elicited that it is necessary to attempt to decrease drilling mud resistivity and to make choice of a drilling mud, taking into account measurement data on strength characteristics of rocks (such as ultimate stress limit (ultimate resistance), microhardness, dynamic strength).

The article illustrates an option of estimating influence exerted by physical properties of water solutions of SAS on alteration of physico-mechanical properties of hard rocks and, on this basis, developing a procedure for quantitative evaluation of weakening effect of washing fluid on rocks, composed of five successive stages, including determination of basic properties of drilling mud and rock under drilling.

The test results obtained with the proposed procedure for quantitative evaluation of weakening effect exerted by washing fluid on rocks under drilling show that the analyzed anion-active SAS exhibit high rock disintegration efficiency coefficient, where the best effect has been achieved with 0.1 % water solution of sodium lauryl sulfate.

Key words: rock, rock weakening, microcracks, reagents–detergents, surface active substances, rock strength, drilling mud, adsorption.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been carried out under the RF President's grant for government support of young Russian scientists, no. MK-4410.2015.5.

REFERENCES

1. Spivak A.I., Popov A.N. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin*: Uchebnik dlya vuzov (Rock disintegration in hole drilling: Textbook for high schools), Moscow, Nedra, 1994, 264 p.
2. Sinyukov Yu.M., Dikhtyar A.A., Krivoruchko A.M., Shmatovskii L.D. *Mekhanika i razrushenie gornykh porod*, vyp. 2 (Mechanics and failure of rocks, issue 2), Kiev, Naukova dumka, 1972, pp. 288–296.
3. Kalinin A.G. *Burenie neftyanykh i gazovykh skvazhin (kurs lektsii)*. Rossiiskii gosudarstvennyi geologorazvedochnyi universitet (Oil and gas well drilling (course of lectures at the Russian State Geological University)), Moscow, Izd. TsentrLitNefteGaz, 2008, 848 p.
4. Gill J.A. *Hard Rock Drilling Problems Explained by Hard Rock Pressure Plots*. Presented at the IADC/SPE Drilling Conference, 20–23 February. 11377-MS. URL: <http://dx.doi.org/10.2118/11377-MS>.
5. Rebinder P.A. Shreiner L.A., Zhigach K.F. *Poniziteli tverdosti v burenii (fiziko-khimicheskii metod oblegcheniya mekhanicheskogo razrusheniya tverdykh gornykh porod pri burenii)* (Rock hardness reducers in drilling (physicochemical method for facilitation of mechanical destruction of hard rocks in drilling)), Moscow, Izd. AN SSSR, 1944, 199 p.
6. Shobolova L.P. *Fiziko-tekhnicheskie problemy dobychi i obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* (Physico-technical problems of mineral mining and processing), Moscow, Izd. AN SSSR. 1980, pp. 137–141.
7. Shreiner L.A., Zhigach K.F. *Burenie shpurov s promyvkoj i dobavkami ponizitelei tverdosti* (Hole drilling with washing and addition of hardness reducers), Moscow-Leningrad, Izd. AN SSSR, 1943, pp. 7–53.
8. Dikhtyar A.A., Krivoruchko A.M., Sinyukov Yu.M. *Mekhanika i razrushenie gornykh porod*, vyp. 2 (Rock mechanics and failure, issue 2), Kiev, Naukova dumka, 1972, pp. 283–288.
9. Kawale D. *Influence of dynamic surface tension on foams: Application in gas well deliquification*: MSc. Thesis. Delft University of Technology of Applied Sciences Department of Multi-Scale Physics, 2012. 97 p.
10. *Sistema analiza formy kapli «EasyDrop». Rukovodstvo po primeneniyu* (EasyDrop standard drop shape analysis. Application guide), KRUSS, GmbH, Hamburg. 2007, 147 p.



УМНАЯ КНИГА – ПРЕДМЕТ ПЕРВОЙ НЕОБХОДИМОСТИ

Далее по списку идут профессиональные требования к книге, о которых филолог даже не подозревал. К примеру, формат 84x108/16 требует верстки в две колонки, а неопытный верстальщик сделал только одну. Расположение таблиц, рисунков, фотографий было выполнено с грубейшими нарушениями стандартов и книжных традиций. И еще много о чем пожалели издатели. Филолог только вставил свою фамилию в эту историческую книгу, и совсем не к месту.

Книгу переделали и выпустили вновь. К услугам филологов больше не обращались. Но профессиональных редакторов остается все меньше: старые уходят, а новых не готовят.

Продолжение на с.