

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Ибрагимов Р.С.*, Бахшалиева Ш.О.

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности,
Азербайджан

AZ1101, Баку, просп. Азадлыг, 34

*Автор, отвечающий за переписку: rafiq.ibrahimov@yahoo.com

MODELING THE OPERATION OF A ROCK-DESTRUCTING TOOL FOR WELL DRILLING

Ibrahimov R.S.*, Bakshaliyeva Sh.O.

Azerbaijan State Oil and Industrial University, Azerbaijan
AZ1101, Baku, Azadlig ave., 34

*Corresponding author: rafiq.ibrahimov@yahoo.com

Keywords: sinking, well,
jet bits, rocks, rock pressure,
fluid density, flushing liquid

Summary. The paper discusses the results of a study of blast hole drilling. The occurrence of pressure in the hole under the influence of a high pressure jet flowing from the nozzles of a jet cone bit is pulsating in nature. In the rock, where rock pressure acts, stress occurs, resulting in rock fatigue. Experiments have shown that the relaxation period, when the liquid retains the properties of a solid body, is measured in millionths of a second, while the spreading period lasts hundreds of times longer. Moreover, the relaxation period is very difficult to detect in experiments. With constant axial load and rotation speed, the mechanical rate of penetration increases with increasing fluid flow. The paper indicates that due to a sharp change in pressure in the pores of the rocks, the liquid enclosed in them is compressed, a hydraulic shock occurs, as a result of which the walls of the pores, expanding, are brittle destroyed. This process occurs when the critical value of the tensile stress is reached. In calculations, hydromechanical destruction of the bottom occurs. In general, the analysis of accumulated experience in modeling the processes of interaction of a rock-destroying tool with a rock has shown the insufficiency of the study of the mechanism of the tool's impact on the rock. The paper shows the need to take into account the elastic characteristics of rocks when calculating the speed of the jet during hydromechanical destruction.

© 2025 Earth Science Division, Azerbaijan National Academy of Sciences. All rights reserved.

Введение

Горные породы являются телами неоднородными как по составу, так и по строению. В связи с этим у пород по сравнению с минералами имеется большое количество дефектов и главным образом по границам зерен. Поэтому силы взаимодействия по границам зерен за редким исключением (у сливных пород) всегда меньше, чем внутри зерен (минералов), слагающих ту или иную породу.

Наличие большого количества дефектов и неоднородность горных пород приводят к тому, что их механические свойства резко отличаются от свойств минералов даже в том случае, если порода является мономинеральной (Spivak, Porov, 1986).

При процессе бурения породоразрушающими долотами на скважинах в результате гидромеханического взаимодействия струи жидкости с горной породой в условиях забоя скважины из-за удара струи происходит дополнительное гидромеханическое разрушение породы. Как известно, физиком Д.Максвеллом было указано, что при определенных условиях жидкость обладает вязко-упругим характером (Maxwell, 2012; Milne-Thomson, 1964). В момент удара жидкость в струе вначале сжимается и только затем начинает растекаться. Опыты показали, что релаксационный период, когда жидкость сохраняет свойства твердого тела, измеряется миллионными долями секунды, а период растекания длится в сотни раз дольше.

Причем период релаксации весьма трудно обнаружить в опытах (Loitsyansky, 2003; Efendiyev et al., 2017). При неизменных осевой нагрузке и скорости вращения механическая скорость проходки во взрывных скважинах с увеличением расхода жидкости возрастает. Существенно улучшить очистку забоя от выбуренных частиц и повысить механическую скорость проходки можно (Stepanova, 1983; Sadovenko, Inkin, 2015), если гидравлическую мощность потока промывочной жидкости реализовать в насадках гидромониторного шарошечного долота.

Цель работы

Целью данной работы являлось исследование процесса бурения, при котором возникает давление в скважине под воздействием напора струи промывочного раствора.

Материалы и методы

Известно, что в горном деле происходит возникновение гидромеханического давления под воздействием высокого напора струи. Промывочный раствор, вытекающий из насадок долота, по своей природе является пульсирующим во время процесса бурения скважины. Следовательно, в породе, где действует горное давление, возникает знакопеременное напряжение, в результате чего происходит усталость породы (Ibrahimov et al., 2022; Efendiyev et al., 2021). Величина небольшого увеличения давления в поровом пространстве за счет распространения упругих продольных волн может быть определена по формуле Н.Е.Жуковского (Rabotnov, 1979):

$$P = \rho_{жс} \nu c \quad (1)$$

где, $\rho_{жс}$ – плотность жидкости;
 ν – скорость струи, потерянная при встрече с поверхностью забоя скважины;
 c – скорость распространения упругих волн расширения, определяемая по формуле (Kozyrev, Shalnev, 1970):

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho_n} \left[\frac{\bar{E}(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} + (am+b)(1-\mu) \right]} \quad (2)$$

где ρ_n – плотность породы; $\bar{E}$ – модуль объемной упругости пористой среды; μ – коэффициент Пуассона породы; m – коэффициент объемной пористости среды; a и b – экспериментальные коэффициенты.

Результаты и Обсуждения

Экспериментально (Fedorenko, 2008; Sadovenko, 1991) было установлено, что модуль упругости для хрупких тел при динамической нагрузке больше, чем при статической.

Так как коэффициент Пуассона при сжатии больше, чем при расширении, следовательно, с ростом глубины скважины его значение должно возрастать. По данным американских и отечественных исследователей (Gavrilenko, Ermakova, 2004; Efendiyev et al., 2024) для песчаника с коэффициентом пористости $m = 0.30$ коэффициент Пуассона равен $\mu = 0.25$, а модуль упругости колеблется в пределах $E = 2.87 \cdot 10^8 \div 1.05 \cdot 10^9$ Н/м².

Экспериментальные коэффициенты, входящие в формулу (2), вычислены для пористого песчаника с коэффициентом пористости $m = 0.25 - 0.30$, плотностью $\rho_n = 2.598 \cdot 10^3$ Н/м³ и модулем упругости $E_n = 4.79 \cdot 10^{10}$ Н/м² и составляют: $a = 2.87 \cdot 10^9 - 1.92 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $b = 2.39 \cdot 10^8 - 9.58 \cdot 10^8$ Н/м². Величина коэффициента деформации скелета порового пространства определяется по формуле (Sudakov, 2020; Brown et al., 2000):

$$\varepsilon = \frac{P \cdot d_n}{4\delta_0 E_n} (2 - \mu) \quad (3)$$

где d_n – диаметр пор; δ_0 – толщина перегородок порового пространства.

Эффективный напор для разрушения угла составляет: $h_{эф} = (30 - 50)f$, где f – коэффициент крепости по Л.А.Шрейнеру, К.В.Руппелю и др. При напоре струи 3-5 МПа разрушаются породы крепостью $f \leq 1$.

Плотность однородного изотропного пористого песчаника определяется по формуле:

$$\rho = (1 - m)\rho_n + m\rho_{жс} \quad (4)$$

С ростом глубины скважины плотность пористой породы изменяется под влиянием давления и температуры.

Было установлено, что при условиях $t > 130^\circ\text{C}$ плотность промывочной жидкости с ростом давления возрастает по линейному закону (Stepanova, 1983; Sadovenko, 1991; Simonov, Vyskrebtssov, 1990).

$$\Delta\rho_p = 4 \cdot 10^{-10} P(I), \quad (5)$$

а с ростом температуры – по квадратичному закону:

$$\Delta\rho_t = 4 \cdot 10^{-5} \rho_0 t + 3 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,4 \rho_0 \left(\frac{t-130}{t} \right)^2. \quad (6)$$

Таким образом, плотность песчаника, насыщенного жидкостью, возрастает с ростом давления и уменьшается с ростом температуры, т.е.

$$\rho_{\delta.p.} = \rho_0 + \Delta\rho_p - \Delta\rho_t. \quad (7)$$

Принимая эффективную пористость породы за абсолютную, для среднего значения объемной упругости можно написать:

$$\bar{E} = \frac{E_{жс} \cdot E_n}{E_{жс}(1-m) + mE_n}. \quad (8)$$

Фактически модуль упругости породы также является функцией давления и температуры.

Скорость распространения звука в жидкости является линейной функцией температуры. Для воды эта зависимость описывается формулой:

$$c_t = 1390 + 3,3t$$

Скорость распространения звука в промысловом растворе в зависимости от давления аппроксимируется согласно линейному закону:

$$c_p = 1512 + 0,275P. \quad (9)$$

При возникновении гидромеханического давления в поровом пространстве в результате взаимодействия высоконапорной струи промысловой жидкости с поверхностью забоя скважины, относительное изменение объема промысловой жидкости в порах породы равно:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3(1-2\mu)}{\bar{E}} P, \quad (10)$$

где, P – давление жидкости, действующее в поровом пространстве породы.

Т.к. плотность промысловой жидкости является функцией давления и температуры, то относительное изменение объема промыслового раствора в поровом пространстве может быть записано в виде (Stepanova, 1983; Kyazimov, Islamov, 2023):

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\rho_{\delta.p.} - \rho_0}{\rho_{\delta.p.}}. \quad (11)$$

Приравнявая (10) и (11), получим:

$$P = \frac{(\rho_{\delta.p.} - \rho_0) \bar{E}}{3\rho_{\delta.p.}(1-2\mu)}, \quad (12)$$

где ρ_0 – плотность промысловой жидкости на устье скважины; $\rho_{\delta.p.}$ – плотность промыслового раствора в условиях забоя скважины; ρ_n – плотность пористого песчаника.

Таким образом, при заданных значениях физических параметров промысловой жидкости и пористой породы скорость струи, необходимая для гидромеханического разрушения забоя скважины, может быть определена на основании совместного решения вышеуказанных формул:

$$v = \frac{\rho_{\delta.p.} - \rho_0}{3\rho_{p,t}^2(1-2\mu)} \cdot \frac{E_{жс} \cdot E_n}{E_{жс}(1-m) + mE_n} \times \sqrt{\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E(1-\mu) + (1-\mu^2)(1-2\mu)(am+b)}} \quad (13)$$

Для качественной оценки различных факторов на механическую скорость бурения при условии обеспечения гидромониторного эффекта по формуле (13) выполнены расчеты, которые проиллюстрированы на рис.1.

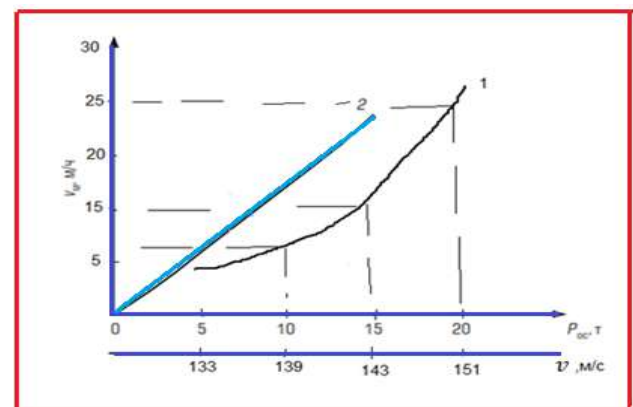


Рис.1. Зависимость механической скорости бурения от скорости струи (1) и осевой нагрузки (2)

Кривые на рис. 1 построены с использованием следующих исходных данных:

$P_{oc} = 5, 10, 15$ и 20 т
 $\rho_{\delta.p.} = 1890; 1850; 1820; 1800$ кг/м³
 $\rho_0 = 1860; 1820; 1790; 1770$ кг/м³
 $a = 2,87 \cdot 10^9$ Н/м²; $b = 2,39 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $m = 0,30$.

Как показывает обзор исследований, посвященных моделированию процесса бурения скважин и принятию решений, разрешение проблемы сводится к построению различных, как детерминированных, так и статистических моделей, а в последнее время и нечетких моделей. Большая роль отводится в последние годы геомеханическому моделированию, и в данном случае основным сдерживающим фактором в применении существующих методик и методических подходов является недостаточное использование возможностей комплексной информации, получаемой в результате геофизических и геолого-технологических исследований в процессе бурения. Применение современных методов при обработке данных и анализе информации позволит повысить качество информации и принимаемых решений.

Применяемое в работах (Efendiyev et al., 2024; Efendiyev et al., 2021; Efendiyev et al., 2019) геомеханическое моделирование дает возможность провести сравнительный анализ изменений свойств горных пород и скорости проходки, выделить однородные интервалы по свойствам горных пород и буримости в целом, проследить за интервалами возможных осложнений и т.д. Таким образом, развитие современных технических средств и технологий для информационного обеспечения процесса бурения скважин и их широкое внедрение допускают повышение качества получаемой информации и требуют ее соответствующего анализа. Оперативная информация, получаемая в процессе бурения, позволяющая производить геомеханическое моделирование, имеет большое значение при бурении скважин, особенно в малоизученных регионах со сложными горно-геологическими и экологическими условиями.

Применение вероятностных методов и нечеткой логики, позволяя производить в оперативном порядке прогнозирование свойств пород, слагающих разрез скважины, и выделение однородных интервалов по комплексу признаков, сыграло большую роль при проектировании

строительства скважин. В опубликованных работах предложена расчетная схема для оценки буримости горных пород, связанной с их свойствами, прогнозируемыми по результатам комплексного каротажа в процессе бурения. По результатам геофизических и геолого-технологических исследований в процессе бурения скважин показаны способы построения уточненной литологической колонки. Предложенные с применением вышеизложенных методов усовершенствованные методика и методические подходы могут быть рекомендованы для анализа данных при бурении, уточнения литологии и границ отдельных типов горных пород, что играет важную роль при принятии решений по выбору технологических параметров бурения скважин.

Заключение

Таким образом, на основе совокупности представленных данных можно сделать вывод, что при изменении давления в порах пород заключенная в них жидкость сжимается, при этом происходит гидравлический удар, в результате чего стенки пор, расширяясь, хрупко разрушаются. При расчетах в результате взаимодействия высоконапорной струи промывочной жидкости в забое скважины с пористыми породами происходит гидромеханическое разрушение забоя. В условиях забоя скважины следует учитывать объемную упругость пористой среды, заполненной жидкостью.

В целом, анализ накопленного опыта моделирования процессов взаимодействия породоразрушающего инструмента с породой показал недостаточность проработки вопросов изучения механизма воздействия инструмента на породу. В связи с этим выполнены сравнительные расчеты по различным выражениям, выявлены актуальные проблемы, на которых необходимо сосредоточить внимание в дальнейших исследованиях. В частности, показана необходимость учета упругих характеристик горных пород при расчете скорости струи при гидромеханическом разрушении.

REFERENCES

- Brown DF, Cuddy SJ, Garmendia Doval AB et al (2000) The prediction of permeability in oil-bearing strata using genetic algorithms. Paper presented at the Third IASTED International Conference Artificial Intelligence and Soft Computing, Banff, Alberta, Canada, 24–26 July 2000
- Efendiyev G, Isayev R, Piriverdiyev I (2021) Decision-making while drilling wells based on the results of modeling the characteristics of rocks using probabilistic-statistical methods and fuzzy logic. *Journal of Physics: Conference Series*, 1828(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1828/1/012016>
- Efendiyev GM, Karazhanova MK, Piriverdiyev IA et al (2024) Assessment of the characteristics of the geological section of wells based on probabilistic-fuzzy analysis of complex geophysical and geological-technological information. *SOCAR Proceedings*, 3:3–8. <https://doi.org/10.5510/OGP2024030098>
- Efendiyev GM, Mammadov PZ, Piriverdiyev IA (2019) Modeling and evaluation of rock properties based on integrated logging while drilling with the use of statistical methods and fuzzy logic. Paper presented at the 10th International Conference on Theory

- and Applications of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions, ICSCCW, Prague, 27-28 August 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC), 1095:503–511
- Efendiyev GM, Mammadov PZ, Piriverdiyev IA et al (2017) Selection of the best combination of bit types and technological parameters during drilling, taking into account uncertainty. Paper presented at the 9th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perception, ICSCCW, Budapest, 22-23 August 2017, Procedia Computer Science, 120:67–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.211>
- Fedorenko PI (2008) Geometric forecasting of qualitative characteristics of ferruginous quartzites of Kryvbas. Collection of scientific works of the AGN of Ukraine, Ukrudprom, Mekhanobrchermet. Krivoy Rog, Ukraine, p 75–79 (in Russian)
- Gavrilenko YuN, Ermakova VN (2004) Man-made consequences of coal mine closure in Ukraine. Monograph. Nord-press, Donetsk, p 631 (in Russian)
- Ibrahimov RS, Bahshaliyeva Sh, Ibrahimov Z (2022) Analysis of the hydraulic characteristics of flushing fluid when gas enters wells drilled from semi-submersible. Nafta-Gaz, 06/2022 (in Polish)
- Kozyrev SP, Shalnev KK (1970) Relaxation hypothesis of the mechanism of collision of a liquid and a solid body. Doc. Academy of Sciences of the USSR, 192(3):552–554 (in Russian)
- Kyazimov EA, Islamov HM (2023) Development of effective compositions of drilling fluids for improving the quality of well drilling in the Caspian Basin of Kazakhstan. SOCAR Proceedings, 1:19–25. <http://dx.doi.org/10.5510/OGP20230100800>
- Loitsyansky LG (2003) Mechanics of liquid and gas. Textbook for universities, 7th edn. Drofa, Moscow, p 840 (in Russian)
- Maxwell DC (2012) Works on Kinetic Theory. Collection of Scientific Papers [Electronic resource]: electronic edition, Binom. Lab. of Knowledge, Moscow, p 406 (in Russian)
- Milne-Thomson LM (1964) Theoretical hydrodynamics. Mir, Moscow, p 656 (in Russian)
- Rabotnov YuN (1979) Mechanics of a deformable solid body. Science, Moscow, p 743
- Sadovenko IA (1991) Synthesis of numerical models in solving problems of control of the geofiltration state of a rock mass. Gorny Zhurnal 12:19–22 (in Russian)
- Sadovenko IA, Inkin AV (2015) Modeling of hydrogeothermal fields during underground combustion of coal seams. Geotechnical mechanics 120:161-171 (in Russian)
- Sedov LI (1980) Continuum Mechanics. vol 2, Science, Moscow, p 568.
- Simonov VV, Vyskrebtsov VG (1990) Operation of a roller bit and their improvement. Nedra, Moscow, p 224 (in Russian)
- Spivak AI, Popov AN (1986) Destruction of rocks during well drilling. Nedra, Moscow, p 208 (in Russian)
- Stepanova GYu (1983) Introduction to fluid dynamics. Mir, Moscow, p 760 (in Russian)
- Sudakov AK (2020) Hydroaeromechanics in Drilling: Textbook. Dnipro Polytechnic National Technical University, Dnipro, Ukraine, p 204 (in Russian)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Ибрагимов Р.С.*, Бахшалиева Ш.О.

*Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, Азербайджан
AZ1101, Баку, просп. Азадлыг, 34*

**Автор, ответственный за переписку: rafiq.ibrahimov@yahoo.com*

Резюме. В статье рассмотрены результаты исследования процесса бурения, при котором возникает давление в скважине под воздействием высокого напора струи, вытекающей из насадок долота. Напор струи в скважине по своей природе является пульсирующим. В породе, где действует горное давление, возникает напряжение, в результате чего происходит усталость породы. Опыты показали, что релаксационный период, когда жидкость сохраняет свойства твердого тела, измеряется миллионными долями секунды, а период растекания длится в сотни раз дольше. Причем период релаксации весьма трудно обнаружить в опытах. При неизменной осевой нагрузке и скорости вращения механическая скорость проходки с увеличением расхода жидкости возрастает. В статье указано, что при заданных значениях физических параметров промывочной жидкости и породы скорость струи, необходимая для гидромеханического разрушения забоя скважины, может быть определена на основании применения эмпирической формулы. Таким образом, в статье показано, что из-за резкого изменения давления в породах на забое жидкость сжимается, происходит гидравлический удар, в результате чего стенки пор, расширяясь, подвергаются хрупкому разрушению. Этот процесс происходит при достижении критического значения растягивающего напряжения. При расчетах в результате взаимодействия высоконапорной струи промывочной жидкости в забое скважины с породами происходит гидромеханическое разрушение забоя. В условиях забоя скважины следует учесть объемную упругость пористой среды, заполненной жидкостью. В целом, анализ накопленного опыта моделирования процессов взаимодействия породоразрушающего инструмента с породой показал недостаточность проработки вопросов изучения механизма воздействия инструмента на породу. В статье показана необходимость учета упругих характеристик горных пород при расчете скорости струи при гидромеханическом разрушении.

Ключевые слова: проходка, скважина, гидромониторные долота, горное давление, плотность жидкости, промывочная жидкость

QUYULARIN QAZILMASI ÜÇÜN SÜXURDAĞIDICI ALƏTİN İŞİNİN MODELLEŞDİRİLMƏSİ

İbrahimov R.S.*, Baxşəliyeva Ş.O.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Azərbaycan

AZ1101 Bakı, Azadlıq prospekti, 34

**Yazışmalara məsul: rafiq.ibrahimov@yahoo.com*

Xülasə. Məqalədə göstərilir ki, qazma prosessinin tədqiqinin nəticələri olaraq hidromonitor baltanın keçmələrindən çıxan axının yüksək təzyiqli şırnağının təsiri altında süxurlarda pulsasiyalı dağılma baş verir. Dağ təzyiqinə məruz qalan süxurda gərginlik yaranır və nəticədə süxurlarda yorğunluğu yaranır. Təcrübələr göstərmişdir ki, məhlulun bərk cismin xüsusiyyətlərini saxladığı relaksasiya dövrü saniyənin milyonda biri ilə ölçülür, yayılma müddəti isə yüzlərlə dəfə uzun çəkir. Üstəlik, təcrübələrdə relaksasiya dövrünü aşkar etmək çox çətindir. Daimi baltaya verilən oxboyu yüklə və alətin fırlanma sürətində, maye axınının artması ilə baltanın mexaniki sürəti artır. Məqalədə göstərilir ki, yuma mayesinin və məsaməli süxurun fiziki parametrlərinin verilmiş qiymətləri üçün quyudibinin hidromexaniki dağıdılması üçün tələb olunan reaktiv sürət empirik formulanın tətbiqi əsasında müəyyən edilə bilər. Beləliklə, məqalədə göstərilir ki süxurun məsamələrində təzyiqin kəskin dəyişməsi nəticəsində quyudibindəki maye sıxılır, hidravlik zərbə baş verir, nəticədə genişlənən məsamə divarları kövrək şəkildə dağılır. Bu proses dartılma gərginliyinin kritik qiymətinə çatdıqda baş verir. Hesablamalarda quyudibində olan yüksək təzyiqli axan mayenin məsaməli süxurlarla qarşılıqlı təsiri nəticəsində süxurda hidromexaniki dağılması baş verir və quyudibi şəraitində süxurlarda maye ilə doldurulmuş məsaməli mühitin həcm elastikliyini nəzərə almaq lazımdır. Ümumiyyətlə, süxurdağıdıcı alətlə süxur arasında qarşılıqlı təsir proseslərinin modelləşdirilməsi üzrə toplanmış təcrübənin təhlili göstərdi ki, alətin süxura təsir mexanizminin öyrənilməsi məsələləri kifayət qədər işlənmişdir. Bununla bağlı müxtəlif ifadələrdən istifadə etməklə müqayisəli hesablamalar aparılmış, gələcək tədqiqatlarda diqqət mərkəzində saxlanılmalı olan cari problemlər müəyyən edilmişdir. Məqalədə süxurun hidromexaniki dağılması zamanı məhlulun axın sürətinin hesablanmasında süxurların elastik xüsusiyyətlərinin nəzərə alınmasının zəruriliyi göstərilir.

Açar sözlər: qazma keçidi, quyu, hidromonitor balta, dağ təzyiqi, məhlulun sıxlığı, yuyucu maye