

ӨОЖ 532.135:541.18:519.237:519.233:553.611

МРНТИ 31.15.37

DOI 10.56525/JUCI9973

ҚАЗАҚСТАН КЕНОРЫНДАРЫНЫҢ САЗДЫ ГИДРОДИСПЕРСИЯЛАРЫНЫҢ РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ СТАТИСТИКАЛЫҚ БАҒАЛАУ

Асанов А., *Мамешова С.А., Әлімбек І.Т.

М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан
e-mail: sayatalisherievna@gmail.com, inoka_07@mail.ru

Аннотация: Жұмыста сазды гидродисперсиялардың реологиялық қасиеттерін тереңірек түсіну мақсатында оларды сандық сипаттау, құрылымдық ұйымдасу дәрежесін кешенді бағалау және концентрация мен полимерлік модификацияның әсерін анықтау үшін сандық модельдеу мен статистикалық талдау әдістері қолданылды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, дисперстік жүйелердің ағын қисықтарын сипаттауда Гершель–Балкли моделі жоғары дәлдікке ие болып ($R^2 > 0,9$), күрделі құрылымданған жүйелер үшін оның тиімділігін растады.

Таған кен орны саздары мысалында концентрацияның артуы жүйеде кеңістіктік құрылымдық тордың қалыптасуына шешуші ықпал ететіні анықталды. Атап айтқанда, ағу шегінің $\tau_0 \propto C^{2,26}$ түріндегі тәуелділігі бөлшектер арасындағы кооперативтік өзара әрекеттесулер нәтижесінде перколяциялық құрылымның түзілуін дәлелдейді. Ал Келес, Қызылорда және Уранғай кен орындарының үлгілерінде реологиялық қасиеттердің концентрацияға тәуелділігі бірімәнді емес екені байқалып, олардың көпфакторлы, яғни минералдық құрамы мен дисперстік жүйенің ішкі құрылымына тәуелді күрделі табиғатын көрсетті.

Сонымен қатар, полимерлік модификацияның енгізілуі жүйелердің реологиялық мінез-құлқын едәуір өзгертетіні анықталды. Натрий карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) қосылғанда жүйелерде псевдопластикалық ағын режимі қалыптасып, құрылымдық беріктік төмендейтіні байқалса, гидроксипропилцеллюлоза (ГПЦ) қолданылған жағдайда жүйе тұрақтанып, ағын индексінің мәні бірлікке жуықтайды, бұл құрылымдық қайта ұйымдасу үдерістерінің бәсеңдеуін көрсетеді.

Осылайша, алынған нәтижелер саз гидродисперсияларының құрылымдық және реологиялық қасиеттерін бағытты түрде реттеудің ғылыми негізін қалыптастырып, оларды бұрғылау ерітінділерінде, сорбенттерде және құрылыс материалдары өндірісінде тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: сазды минерал, бентонит, гидродисперсия, реология, сандық модельдеу, ығысу кернеуі, ағу шегі.

Кіріспе

Сазды гидродисперсиялар күрделі дисперстік жүйелер қатарына жатады және олардың реологиялық қасиеттері әртүрлі физика-химиялық факторларға тәуелді болып келеді. Мұндай жүйелердің тұтқырлығы, ығысу кернеуі және ағу шегі сияқты негізгі параметрлері уақытқа, концентрацияға, бөлшектердің өзара әсерлесуіне және минералдық құрамына байланысты өзгеріп отырады [1, 2]. Сондықтан сазды гидродисперсиялардың реологиялық қасиеттерін тек эксперименттік жолмен сипаттау жеткіліксіз, оларды сандық модельдеу және статистикалық өңдеу әдістері арқылы тереңірек талдау қажеттілігі туындайды.

Қазақстанның әртүрлі кенорындарынан алынған сазды материалдар өздерінің минералдық құрамы мен құрылымдық ерекшеліктері бойынша бір-бірінен едәуір айырмашылық көрсетеді. Бұл айырмашылықтар олардың судағы дисперсияларының реологиялық қасиеттеріне тікелей әсер етеді. Осыған байланысты әртүрлі кенорын

саздарының гидродисперсияларын сипаттау үшін әмбебап математикалық модельдерді қолдану және олардың параметрлерін нақтылау өзекті ғылыми бағыттардың бірі болып табылады [3].

Қазіргі уақытта сазды суспензиялардың ағу ерекшеліктерін сипаттауда Бингам, Кассон және Гершель–Балкли сияқты ньютондық емес модельдер кеңінен қолданылады. Дегенмен нақты жүйелер үшін бұл модельдердің сәйкестігін бағалау және алынған параметрлердің сенімділігін статистикалық тұрғыдан негіздеу маңызды рөл атқарады. Бұл үшін эксперименттік деректерді өңдеуде регрессиялық талдау, модель дәлдігін бағалау критерийлері және қателік анализі әдістері қолданылады.

Осы жұмыстың мақсаты – Қазақстанның әртүрлі кенорындарынан алынған сазды гидродисперсиялардың реологиялық қасиеттерін сандық модельдеу және алынған модельдердің адекваттылығын статистикалық бағалау. Зерттеу нәтижелері сазды жүйелердің құрылымдық және реологиялық қасиеттерін тереңірек түсінуге, сондай-ақ оларды тәжірибелік және өнеркәсіптік қолдану салаларында тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Зерттеу нысандары ретінде Қазақстанның Келес (Түркістан облысы, Сарыағаш ауданы), Уранғай (Түркістан облысы, Созақ ауданы), Қызылорда (Қызылорда облысы) және Таған (Шығыс Қазақстан облысы) кен орындарынан алынған табиғи бентонитті саздар пайдаланылды.

Зерттеуде келесі полимерлік материалдар қолданылды:

- молекулалық массасы 150 000 г/моль болатын полиакриламид (ПАА);
- молекулалық массасы 80 000 г/моль гидроксипропилцеллюлоза (ГПЦ, Klucel EF PHARM сауда маркасы);
- молекулалық массасы 250 000 г/моль натрий карбоксиметилцеллюлоза (Na-KMЦ).

Зерттеу жүргізу үшін саз үлгілері алдын ала бөлме температурасында құрғақ күйге дейін кептірілді, кейін ұсақталып, ГОСТ 21216–2014 стандартына сәйкес саңылау өлшемі 0,25 мм болатын електен өткізілді және әр үлгіге шартты белгі берілді.

Сазды гидродисперсияларды дайындау үшін 2,5 г ұнтақталған саз үлгісі 50 мл градуирленген өлшеу цилиндріне салынды. Үлгіге 22,5 мл дистилденген су құйылып, цилиндр герметикалық түрде жабылды. Қоспа 10 рет жоғары-төмен бағытта біркелкі араластырылды. Гидродисперсия тепе-теңдік күйіне жету үшін 24 сағатқа қалдырылды. Бір тәуліктен соң цилиндрлер жоғарыда айтылған тәсілмен қайтадан араластырылып, дистилденген сумен көлемі 25 мл-ге дейін толықтырылып және араластырылды [4].

Сазды гидродисперсиялардың реологиялық қасиеттері коаксиалды цилиндрлер жүйесімен жабдықталған VT550 үлгідегі айналмалы вискозиметрде (Haake, Германия) зерттелді. Тәжірибе $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ температурада, қатты фазаның массалық үлесі 5% - 20%-ға дейінгі дисперсияларда жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері. Зерттелген үлгілердің реологиялық қасиеттері авторлардың [5] жұмысында егжей-тегжейлі анықталған. Ендігі мақсат сазды гидродисперсиялардың реологиялық қасиеттерін сандық сипаттау, олардың құрылымдық ұйымдасу дәрежесін объективті бағалау және концентрация мен полимерлік модификация әсерін анықтау мақсатында сандық модельдеу және статистикалық талдау жүргізілді.

Дисперстік жүйелердің реологиялық қасиеттерін сипаттауда жартылай эмпирикалық модельдер кеңінен қолданылады, олардың ішінде Гершель–Балкли моделі күрделі құрылымданған жүйелер үшін ең тиімді модель болып табылады [6, 7].

Ағын қисықтарын сипаттау үшін келесі теңдеу қолданылды:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

мұндағы

τ - ығысу кернеуі (Па);

τ_0 - ағу шегі (Па);

K - консистенция коэффициенті;

n - ағын индексі;

$\dot{\gamma}$ - ығысу жылдамдығы (с^{-1}).

Модель параметрлері ең кіші квадраттар әдісіне негізделген итерациялық сәйкестендіру арқылы анықталды. Аппроксимация сапасы детерминация коэффициентімен (R^2), сондай-ақ регрессияның статистикалық маңыздылығы р-мәндері арқылы бағаланды. Алынған параметрлер 1-кестеде келтірілген.

1-кесте - Сазды гидродисперсия үлгілері үшін Гершель–Балкли параметрлері

Үлгілер (C %)	τ_0 (Па)	K	n	R^2
Таған 5%	1,980	$6,45 \cdot 10^{-5}$	1,73	0,996
Таған 7%	4,240	$1,28 \cdot 10^{-3}$	1,32	0,908
Таған 10%	анықталмады*	10,76	0,15	0,814
Келес 5%	0,264	$2,62 \cdot 10^{-4}$	1,46	0,996
Қызылорда 5%	0,118	$2,27 \cdot 10^{-5}$	1,81	0,993
Уранғай 5%	0,111	$6,47 \cdot 10^{-4}$	1,30	0,997

*10% Таған жүйесінде τ_0 сенімді анықталмады.

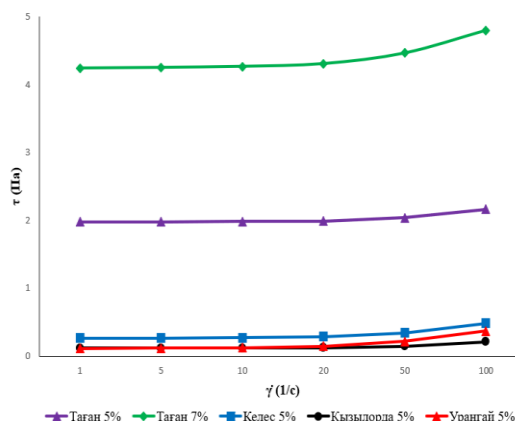
1-кесте мәліметтері бойынша Таған кен орнының 5% және 7% гидродисперсияларында τ_0 мәндерінің жоғары болуы жүйеде кеңістіктік құрылымдық тордың қалыптасқанын дәлелдейді.

Ағын индексінің $n > 1$ мәндері зерттелген жүйелердің бірқатарында дилатанттық ағын режимінің қалыптасуын айқындайды. Бұл құбылыс жоғары концентрация жағдайында бөлшектер арасындағы гидродинамикалық өзара әрекеттесулердің күшеюімен байланысты [8].

10% Таған жүйесінде $R^2 = 0,814$ мәні модель сәйкестігінің төмен деңгейін айқындайды. Сонымен қатар уақытқа тәуелді құрылымдық қайта ұйымдасу байқалып, жүйенің тиксотропиялық сипатын айқындайды [9].

1-кестеде анықталған параметрлер негізінде Гершель–Балкли моделі бойынша есептелген ағын қисықтары (1-сурет) келтірілген. Барлық жүйелер үшін τ – $\dot{\gamma}$ тәуелділігі сызықтық емес сипатқа ие. Таған гидродисперсияларында қисықтардың жоғары орналасуы және олардың өсу қарқынының айқын болуы бөлшектер арасындағы кооперативтік өзара әрекеттесулердің күшеюін және құрылымдық тордың қалыптасуын сипаттайды.

Ал Келес, Қызылорда және Уранғай үлгілерінде қисықтардың төмен орналасуы олардың әлсіз құрылымданған жүйелерге жататынын айқындайды.



1-сурет - Гершель–Балкли моделі бойынша есептелген ағын қисықтары

Құрылымдық ұйымдасу деңгейінің концентрацияға сезімталдығын бағалау үшін ағу шегінің салыстырмалы өзгерісі есептелді:

$$\Delta \tau_0 (\%) = (\tau_{02} - \tau_{01}) / \tau_{01} \times 100 \quad (2)$$

Есептеу нәтижелері 2-кестеде келтірілген. Кесте мәліметтері бойынша Таған жүйесінде 5→7% концентрация аралығында ағу шегі τ_0 мәні 114%-ға артатыны анықталды. Бұл концентрацияның артуымен бөлшектер арасындағы кооперативтік өзара әрекеттесулердің күшеюіне және құрылымдық тордың қалыптасуына байланысты.

2 - кесте – Концентрацияға байланысты τ_0 өзгерісінің салыстырмалы бағалануы

Үлгілер (C %)	τ_0 (Па)	5→7 % өзгеріс	7→10 % өзгеріс
Таған 5%	1,98	114 %	—
Таған 7%	4,24	—	—
Таған 10%	анықталмады*	—	—
Келес 5%	0,264	–70 %	68 %
Келес 7%	0,079	—	—
Келес 10%	0,133	—	—
Қызылорда 5%	0,118	53 %	–62 %
Қызылорда 7%	0,181	—	—
Қызылорда 10%	0,070	—	—
Уранғай 5%	0,111	116 %	–75 %
Уранғай 7%	0,239	—	—
Уранғай 10%	0,061	—	—

*10% Таған жүйесінде уақытқа тәуелді тиксотропиялық құрылымдық қайта ұйымдасу салдарынан стационарлық ағу шегі (τ_0) параметрі сенімді түрде анықталмады.

Ал Келес, Қызылорда және Уранғай үлгілерінде τ_0 мәндерінің концентрацияға тәуелділігі монотонды сипат көрсетпейді (–70%-дан +116%-ға дейінгі ауытқулар байқалады). Бұл жүйелерде құрылымның тұрақсыз және динамикалық қайта ұйымдасуға бейім екенін көрсетеді.

Салыстырмалы өзгеріс талдауы жүйелердің құрылымдық тұрақтылығын сипаттауға мүмкіндік береді, алайда анықталған заңдылықтарды сандық тұрғыдан негіздеу үшін қосымша регрессиялық талдау жүргізілді.

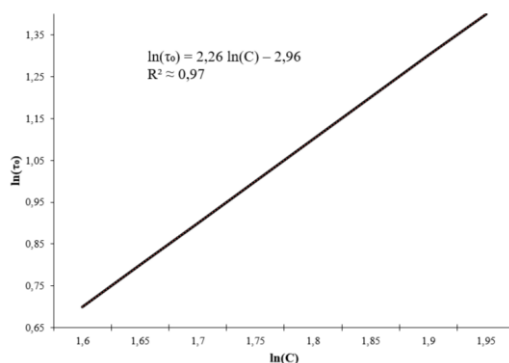
Таған жүйесінде τ_0 мәнінің 114%-ға артуы концентрацияның өсуімен құрылымдық тордың қарқынды қалыптасатынын дәлелдейді. Ал басқа жүйелерде τ_0 мәндерінің тұрақсыз өзгеруі құрылымның динамикалық қайта ұйымдасуға бейімділігін сипаттайды.

Ағу шегінің τ_0 концентрацияға тәуелділігі дәрежелік заңмен сипатталды:

$$\tau_0 = A \cdot C^m \quad (3)$$

Бұл тәуелділік логарифмдеу арқылы сызықтық түрге келтірілді:

$$\ln(\tau_0) = \ln(A) + m \cdot \ln(C) \quad (4)$$



2 - сурет - $\ln(\tau_0) - \ln(C)$ координаталарындағы тәуелділік

Логарифмдік координаталарда ($\ln \tau_0 - \ln C$) жүргізілген регрессиялық талдау нәтижесінде Таған үлгісі үшін келесі тәуелділік анықталды:

$$\tau_0 \propto C^{2.26} \quad (5)$$

$\ln(\tau_0) - \ln(C)$ координаталарында алынған тәуелділіктің сызықтық сипаты $\tau_0 = A \cdot C^m$ дәрежелік заңның орындалатынын айқындайды. Регрессиялық талдау нәтижесінде $\ln(\tau_0) = 2,26$ $\ln(C) - 2,96$ теңдеуі алынды. Алынған параметрлер ($R^2 \approx 0,97$; $p < 0,05$) тәуелділіктің статистикалық тұрғыдан сенімді екенін және модельдің эксперименттік деректерге жақсы сәйкестігін көрсетеді.

$m \approx 2,26$ мәні концентрация артқан сайын жүйеде құрылымдық тордың перколяциялық типте қалыптасатынын, яғни бөлшектер арасында кеңістіктік байланысқан құрылымның түзілетінін айқындайды [10].

Ал Келес, Қызылорда және Уранғай жүйелерінде алынған регрессиялық тәуелділіктердің статистикалық параметрлері ($R^2 < 0,8$; $p > 0,05$) олардың сенімді емес екенін көрсетеді. Бұл жүйелерде концентрация реологиялық қасиеттерді анықтайтын негізгі фактор болып табылмайтынын және олардың көпфакторлы сипатқа ие екенін білдіреді.

Полимерлік модификацияланған жүйелердің Гершель–Балкли моделі негізінде анықталған реологиялық параметрлері 3-кестеде келтірілген.

3-кесте - Полимерлік модификацияланған жүйелер

Үлгілер	τ_0 (Па)	K	n	R^2
Келес 5% (бастапқы)	0,264	$2,62 \cdot 10^{-4}$	1,460	0,996
Келес + 0,5% КМЦ	—	0,407	0,631	0,992
Келес + 5% ГПЦ	0,367	0,036	1,047	0,994
Қызылорда 5% (бастапқы)	0,118	$2,27 \cdot 10^{-5}$	1,810	0,993
Қызылорда + 0,5% КМЦ	—	0,363	0,654	0,999
Қызылорда + 5% ГПЦ	0,136	0,040	1,036	0,999
Уранғай 5% (бастапқы)	0,111	$6,47 \cdot 10^{-4}$	1,300	0,997
Уранғай + 0,5% КМЦ	—	0,509	0,624	0,999
Уранғай + 5% ГПЦ	0,073	0,041	1,037	0,999

Ескерту: «—» белгісі τ_0 параметрінің 95% сенімділік деңгейінде нөлден статистикалық тұрғыдан ажыратылмайтынын ($p > 0,05$) және оның мәнін сенімді анықтау мүмкін болмағанын білдіреді.

3-кесте мәліметтері бойынша КМЦ енгізілген жүйелерде ағу шегі τ_0 параметрі 95% сенімділік деңгейінде статистикалық тұрғыдан маңызсыз екені анықталды ($p > 0,05$), ал ағын индексі $n < 1$ мәндеріне төмендейді. Бұл жүйелерде псевдопластикалық ағын режимінің қалыптасуын сипаттайды. Аталған құбылыс полимер тізбектерінің дисперстік бөлшектер бетіне адсорбциялануы нәтижесінде құрылымдық тордың әлсіреуімен және жүйенің құрылымдық беріктігінің төмендеуімен түсіндіріледі.

ГПЦ қолданылған жүйелерде, керісінше, τ_0 параметрі сақталып, ағын индексі $n \approx 1$ мәніне жақындайды. Бұл жүйенің реологиялық тұрғыдан тұрақтануын және құрылымдық қайта ұйымдасу үдерістерінің бәсеңдеуін айқындайды.

Осылайша, алынған нәтижелер полимер–бөлшек өзара әрекеттесуінің дисперстік жүйелердің реологиялық қасиеттеріне шешуші әсер ететінін негіздейді [11,12].

Қорытынды. Жүргізілген сандық модельдеу және статистикалық талдау нәтижелері зерттелген саз гидродисперсияларының реологиялық мінез-құлқын жүйелі түрде сипаттауға мүмкіндік берді. Атап айтқанда, барлық қарастырылған жүйелер үшін ағын қисықтарын сипаттауда Гершель–Балкли моделі жоғары дәлдік көрсетті ($R^2 > 0,9$), бұл оның қолданылу тиімділігін дәлелдейді.

Таған кен орны саздары үшін дисперстік фазаның концентрациясы құрылымдық тордың түзілуіне шешуші фактор екені анықталды. Бұл жүйеде ығысу кернеуінің шектік мәні мен концентрация арасындағы $\tau_0 \propto C^{2.26}$ тәуелділігі перколяциялық құрылымның қалыптасуын сипаттайды.

Сонымен қатар, полимерлік модификацияның енгізілуі дисперстік жүйелердің реологиялық қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік беретіні көрсетілді. Ал Келес, Қызылорда және Уранғай кен орындарының саздары үшін реологиялық қасиеттердің көпфакторлы сипаты анықталып, олардың құрамы мен құрылымдық ерекшеліктеріне тәуелді екені дәлелденді.

Осылайша, алынған нәтижелер саз гидродисперсияларының қасиеттерін басқарудың ғылыми негізін қалыптастырып, оларды бұрғылау ерітінділерінде, сорбенттерде және құрылыс материалдарында тиімді қолдануға мүмкіндік береді.

ӘДЕБИЕТТЕР

1. Luckham, P. F., & Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82(1–3), 43–92. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(99\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(99)00005-6)
2. Lin, Y., Qin, H., Guo, J., & Chen, J. (2021). Rheology of bentonite dispersions: Role of ionic strength and solid content. *Applied Clay Science*, 214, 106275. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106275>
3. Ni, H., & Huang, Y. (2020). Rheological study on influence of mineral composition on viscoelastic properties of clay. *Applied Clay Science*, 187, 105493. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105493>
4. Asanov, A., & Mameshova, S. (2021). Influence of functional polyelectrolytes on the stability of clay hydrodispersions. *Chemical Papers*, 75, 5695–5703. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01718-4>
5. А. Асанов, С.А. Мамешова, Г.С. Татыханова, Т.А. Савицкая Химико-минералогический анализ глин казахстана и исследование свойств их гидродисперсий // Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2025; (2), 182–205.
6. Magnon, E., Cayeux, E., & Saasen, A. (2021). Precise method to estimate the Herschel–Bulkley parameters from experimental data. *Fluids*, 6(4), 157. <https://doi.org/10.3390/fluids6040157>
7. Rooki, R., Ardejani, F. D., Moradzadeh, A., Mirzaei, H., Kelessidis, V. C., Maglione, R., & Norouzi, M. (2012). Optimal determination of rheological parameters for Herschel–Bulkley drilling fluids using genetic algorithms (GAs). *Korea-Australia Rheology Journal*, 24(3), 163–170. <https://doi.org/10.1007/s13367-012-0020-3>
8. Wagner, N. J., & Brady, J. F. (2009). Shear thickening in colloidal dispersions. *Physics Today*, 62(10), 27–32. <https://doi.org/10.1063/1.3248476>
9. Mewis, J., & Wagner, N. J. (2009). Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 147–148, 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.005>
10. Winter, H. H., & Chambon, F. (1986). Analysis of linear viscoelasticity of a gel point. *Journal of Rheology*, 30(2), 367–382. <https://doi.org/10.1122/1.549853>
11. Bonn, D., Denn, M. M., Berthier, L., Divoux, T., & Manneville, S. (2017). Yield stress materials in soft condensed matter. *Reviews of Modern Physics*, 89(3), 035005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035005>
12. А.Р.Тогашева, А.Алданыш, О.Ф.Ғайытов. Полимерлі суландыру технологиясындағы полиакриламидтердің физика-химиялық және реологиялық қасиеттері. Yessenov Science Journal, №3 (52), 2025, 355–3646.

REFERENCES

1. Luckham, P. F., & Rossi, S. (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82(1–3), 43–92. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(99\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(99)00005-6)
2. Lin, Y., Qin, H., Guo, J., & Chen, J. (2021). Rheology of bentonite dispersions: Role of ionic strength and solid content. *Applied Clay Science*, 214, 106275. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106275>
3. Ni, H., & Huang, Y. (2020). Rheological study on influence of mineral composition on viscoelastic properties of clay. *Applied Clay Science*, 187, 105493. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105493>
4. Asanov, A., & Mameshova, S. (2021). Influence of functional polyelectrolytes on the stability of clay hydrodispersions. *Chemical Papers*, 75, 5695–5703. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01718-4>
5. A. Asanov, S. A. Mameshova, G. S. Tatyhanova, T. A. Savitskaya. Khimiko-mineralogicheskij analiz glin Kazahstana i issledovanie svojstv ih gidrodispersij // *Academic Journal of Physical and Chemical Sciences*. – 2025. – №2. – P. 182–205.
6. Magnon, E., Cayeux, E., & Saasen, A. (2021). Precise method to estimate the Herschel–Bulkley parameters from experimental data. *Fluids*, 6(4), 157. <https://doi.org/10.3390/fluids6040157>
7. Rooki, R., Ardejani, F. D., Moradzadeh, A., Mirzaei, H., Kelessidis, V. C., Maglione, R., & Norouzi, M. (2012). Optimal determination of rheological parameters for Herschel–Bulkley drilling fluids using genetic algorithms (GAs). *Korea-Australia Rheology Journal*, 24(3), 163–170. <https://doi.org/10.1007/s13367-012-0020-3>
8. Wagner, N. J., & Brady, J. F. (2009). Shear thickening in colloidal dispersions. *Physics Today*, 62(10), 27–32. <https://doi.org/10.1063/1.3248476>
9. Mewis, J., & Wagner, N. J. (2009). Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 147–148, 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.005>
10. Winter, H. H., & Chambon, F. (1986). Analysis of linear viscoelasticity of a gel point. *Journal of Rheology*, 30(2), 367–382. <https://doi.org/10.1122/1.549853>
11. Bonn, D., Denn, M. M., Berthier, L., Divoux, T., & Manneville, S. (2017). Yield stress materials in soft condensed matter. *Reviews of Modern Physics*, 89(3), 035005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035005>
12. A.R. Togasheva, A. Aldanysh, O.G. Gayutov. Physicochemical and rheological properties of polyacrylamides in polymer hydration technology. *Yessenov Science Journal*, №3 (52), 2025, p. 355–364.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЛИНИСТЫХ ГИДРОДИСПЕРСИЙ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЗАХСТАНА**

Асанов А., *Мамешова С.А., Әлімбек І.Т.

Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан
E-mail: sayatalisherievna@gmail.com, inoka_07@mail.ru

Аннотация: В работе для более глубокого понимания реологических свойств глинистых гидродисперсий применены методы численного моделирования и статистического анализа, направленные на их количественное описание, комплексную оценку степени структурной организации, а также выявление влияния концентрации и полимерной

модификации. Результаты исследования показали, что модель Гершеля–Балкли обеспечивает высокую точность описания кривых течения дисперсных систем ($R^2 > 0,9$), подтверждая её эффективность для сложноструктурированных систем.

На примере глин Таганского месторождения установлено, что увеличение концентрации оказывает решающее влияние на формирование пространственной структурной сетки. В частности, зависимость предела текучести вида $\tau_0 \propto C^{2.26}$ свидетельствует о формировании перколяционной структуры вследствие кооперативных взаимодействий между частицами. В то же время для образцов Келесского, Кызылординского и Урангайского месторождений выявлен неоднозначный характер зависимости реологических свойств от концентрации, что указывает на их многофакторную природу, обусловленную минеральным составом и внутренней структурой дисперсной системы.

Кроме того, установлено, что введение полимерной модификации существенно изменяет реологическое поведение систем. При добавлении натрий карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) наблюдается формирование псевдопластического режима течения и снижение структурной прочности, тогда как применение гидроксипропилцеллюлозы (ГПЦ) приводит к стабилизации системы и приближению значения показателя течения к единице, что свидетельствует о замедлении процессов структурной реорганизации.

Таким образом, полученные результаты формируют научную основу для направленного регулирования структурных и реологических свойств глинистых гидродисперсий и открывают возможности их эффективного применения в буровых растворах, сорбентах и строительных материалах.

Ключевые слова: глинистый минерал, бентонит, гидродисперсия, реология, численное моделирование, сдвиговое напряжение, предел текучести.

NUMERICAL MODELING AND STATISTICAL EVALUATION OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CLAY HYDRODISPERSIONS FROM KAZAKHSTAN DEPOSITS

Assanov A., *Mameshova S., Alimbek Y.

Taraz University named after M. D. Dulati, Taraz, Kazakhstan

E-mail: sayatalisherievna@gmail.com, inoka_07@mail.ru

Abstract: In this study, numerical modeling and statistical analysis were applied to achieve a deeper understanding of the rheological properties of clay hydrodispersions. The work focuses on their quantitative characterization, comprehensive evaluation of structural organization, and determination of the effects of concentration and polymer modification. The results demonstrate that the Herschel–Bulkley model provides a high level of accuracy in describing the flow curves of dispersed systems ($R^2 > 0.9$), confirming its effectiveness for complex structured systems.

Using clays from the Tagan deposit as an example, it was found that increasing concentration plays a decisive role in the formation of a spatial structural network. In particular, the dependence of the yield stress following $\tau_0 \propto C^{2.26}$ indicates the formation of a percolation structure due to cooperative interactions between particles. In contrast, for the Keles, Kyzylorda, and Urangai deposits, the dependence of rheological properties on concentration is non-monotonic, reflecting a multifactorial nature governed by mineral composition and the internal structure of the dispersed system.

In addition, it was established that polymer modification significantly alters the rheological behavior of the systems. The addition of sodium carboxymethyl cellulose (CMC) leads to the formation of a pseudoplastic flow regime accompanied by a decrease in structural strength, whereas the use of hydroxypropyl cellulose (HPC) results in system stabilization and a flow behavior index approaching unity, indicating a reduction in structural reorganization processes.

Thus, the obtained results provide a scientific basis for the targeted regulation of the structural and rheological properties of clay hydrodispersions and enable their effective application in drilling fluids, sorbents, and construction materials.

Keywords: clay mineral, bentonite, hydrodispersion, rheology, numerical modeling, shear stress, yield stress.