



Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина"

Научно-технический журнал

СТРОИТЕЛЬСТВО НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН НА СУШЕ И НА МОРЕ

Scientific-technical journal

**Construction
of oil and gas wells on land
and sea**

При участии



АНКЛАВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

СТРОИТЕЛЬСТВО НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН НА СУШЕ И НА МОРЕ

Январь 2020 г.

№ 1(325)

Издается с 1993 г.
Выходит 12 раз в год

Учредитель

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина"

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Близнюков В.Ю. (главный редактор) – д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, акад. Украинской нефтегазовой академии, г. Москва

Липатов В.И. (зам. главного редактора) – канд. техн. наук, г. Москва,

Быков И.Ю. (зам. главного редактора) – д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, г. Ухта,

Агзамов Ф.А. – д-р техн. наук, проф., г. Уфа,

Антониади Д.Г. – д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, г. Краснодар,

Бастриков С.Н. – д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, г. Тюмень,

Вахромеев А.Г. – д-г.м.н., доцент, г. Иркутск,

Войтенко В.С. – д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, акад. Украинской нефтегазовой академии, г. Минск,

Евсеев В.Д. – д-р техн. наук, проф., г. Томск,

Кузнецов Ю.С. – д-р техн. наук, проф., г. Москва,

Куликов В.В. – д-р техн. наук, проф., г. Москва,

Кунина П.С. – д-р техн. наук, проф., г. Краснодар,

Курбанов Я.М. – д-р техн. наук, проф., г. Тюмень,

Литвиненко В.С. – д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, РАГН, МАНЭБ, г. Санкт-Петербург,

Мамедтагизаде А.М. – д-р техн. наук, проф., акад. Международной академии наук, г. Баку,

Мыслюк М.А. – д-р техн. наук, проф., акад. Украинской нефтегазовой академии, г. Ивано-Франковск,

Нескоромных В.В. – д-р техн. наук, проф., г. Красноярск,

Нижник А.Е. – д-р техн. наук, проф., г. Краснодар,

Николаев Н.И. – д-р техн. наук, проф., г. Санкт-Петербург,

Озанов А.С. – д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, г. Москва,

Повалихин А.С. – д-р техн. наук, доцент, акад. РАЕН, г. Москва,

Рябоконь С.А. – д-р техн. наук, проф., г. Краснодар,

Сочнев О.Я. – д-р техн. наук, член-кор. РАЕН, г. Москва,

Трифанов Г.Д. – д-р техн. наук, проф., г. Пермь,

Хегай В.К. – д-р техн. наук, проф., член-кор. РАЕН, г. Ухта,

Хузина Л.Б. – д-р техн. наук, доцент, г. Альметьевск,

Шайдаков В.В. – д-р техн. наук, проф., г. Уфа.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ БУРЕНИЯ

- Попов А.Н., Трушкин О.Б., Попов М.А.** Согласование типа вооружения долота с забойными условиями бурения скважины5
- Хузина Л.Б., Гимазтдинова Э.А., Габзалилова А.Х.** Долото-башмак для бурения на обсадной колонне10
- Близнюков В.Ю., Гаджиев Н.Р.** Обзор основных принципов технологии бурения с управлением скважинным давлением13

ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТ

- Богомолов Р.М., Сериков Д.Ю., Сердюк Н.И.** Шарошечные долота с повышенным удельным давлением на породу19
- Богомолов Р.М., Гринев А.М.** Долота PDC со сменными промывочными узлами новой конструкции25

БУРОВЫЕ РАСТВОРЫ

- Мыслюк М.А., Жолоб Н.Р.** Исследование реологических и структурно-механических свойств биополимерной системы в условиях высоких температур31

ЗАКАНЧИВАНИЕ СКВАЖИН

- Вороник А.М., Каменских С.В., Уляшева Н.М.** Разработка и исследование облегченной коррозионностойкой тампонажной смеси для крепления высокопроницаемых горных пород, вмещающих агрессивные флюиды40
- Карманский Д.А., Петраков Д.Г.** Анализ изменения свойств коллекторов нефти и газа на различных этапах разработки нефтяных месторождений46

БУРЕНИЕ НА МОРЕ

- Петренко В.Е., Мирзоев Д.А., Богатырева Е.В.** Проблемы изучения факторов морской окружающей среды и создания нефтегазопромысловых инженерных сооружений для освоения континентального шельфа Арктики51
- Сочнева И.О.** Российская заявка на расширение шельфа Арктики в современных условиях развития мировой морской добычи углеводородов55

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

- Симонянц Сергей Липаритович – 70 лет63

CONSTRUCTION OF OIL AND GAS WELLS ON LAND AND SEA

January 2020

№ 1(325)

published since 1993
12 issues per year

CONTENTS

DRILLING TECHNIQUE AND TECHNOLOGY

- Popov A.N., Trushkin O.B., Popov M.A.* Adapting of a drill bit cutting structures type with the bottom-hole conditions of a well drilling5
Khuzina L.B., Gimazdinova E.A., Gabzalilova A.H. Bit-shoe for drilling on a casing string10
Bliznyukov V.Y., Hadzhiev N.R. Review of the main principles of the drilling technology with bottom hole pressure control13

EQUIPMENT AND TOOLS

- Bogomolov R.M., Serikov D.Yu., Serdyuk N.I.* Roller-cone drill bits with increased specific pressure on the rock19
Bogomolov R.M., Grinev A.M. PDC drill bits with interchangeable new-designed flushing units25

DRILLING FLUIDS

- Myslyuk M.A., Zholob N.R.* Research of rheological and structural-mechanical properties of a biopolymer system under high temperature conditions31

WELLS COMPLETION

- Voronik A.M., Kamenskikh S.V., Ulyasheva N.M.* Development and research of lightweight corrosion-resistant cement slurry for fastening highly permeable rocks containing aggressive fluids40
Karmanskiy D.A., Petrakov D.G. Analysis of changes in the properties of oil and gas collectors at different stages of oil deposit development46

DRILLING ON THE SHELF

- Petrenko V.E., Mirzoev D.A., Bogatyreva E.V.* Problems of studying marine environmental factors and creation of oil- and gas-field engineering structures for the development of the Arctic continental shelf51
Sochneva I.O. Russian application for the Arctic shelf extension in modern conditions of the development of the world offshore hydrocarbon production55

ANNIVERSARY

- Simonyants Sergey Liparitovitch – 70 year anniversary63

Founder of journal – National University of Oil and Gas "Gubkin University"

EDITORIAL BOARD:

Bliznyukov V.Yu. (Chief editor) – DSc, professor,

Lipatov V.I. (Deputy Chief editor) – Phd,
Bykov I.Yu. (Deputy Chief editor) – DSc, professor,

Agzamov F.A. – DSc, professor,

Antoniadi D.G. – DSc, professor,

Bastrikov S.N. – DSc, professor,

Vakhromeev A.G. – DSc, professor,

Voytenko V.S. – DSc, professor,

Evseev V.D. – DSc, professor,

Kuznetsov Yu.S. – DSc, professor,

Kulikov V.V. – DSc, professor,

Kunina P.S. – DSc, professor,

Kurbanov Ya.M. – DSc, professor,

Litvinenko V.S. – DSc, professor,

Mamedtagizade A.M. – DSc, professor,

Myslyuk M.A. – DSc, professor,

Neskoromny V.V. – DSc, professor,

Nikolaev N.I. – DSc, professor,

Nizhnik A.E. – DSc, professor,

Oganov A.S. – DSc, professor,

Povalikhin A.S. – DSc, professor,

Ryabokon S.A. – DSc, professor,

Sochnev O.Ya. – DSc, professor,

Trifanov G.D. – DSc, professor,

Khegay V.K. – DSc, professor,

Khuzina L.B. – DSc, professor,

Shaidakov V.V. – DSc, professor.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

М.А. Мыслюк¹, Н.Р. Жолоб²

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,

²ООО Геосинтез Инжиниринг, г. Полтава)

Изучены реологические и структурно-механические свойства биополимерной системы с добавками (мас. %) ксантановой камеди (0,2–0,4), экструзионного крахмала (1,5–2,5), карбонатного наполнителя (25), органо-минерального коагумента Alevron® (0,5), формиатов натрия (50) и калия (10–230) при температурах 25 и 130–170 °С. Показано, что для различных сочетаний переменных факторов наиболее адекватными являются реологические модели Гершеля – Балкли, Шульмана – Кессона, Оствальда и некоторых бивязких жидкостей, а для плана экспериментов – модель Гершеля – Балкли.

Построены уравнения регрессии для прогнозирования реологических и структурно-механических свойств биополимерной системы в зависимости от состава и температуры. Приведены результаты анализа показателей реологических и структурно-механических свойств.

Ключевые слова: биополимерная система; бивязкая жидкость; реологические свойства; ротационная вискозиметрия; структурно-механические свойства; уравнения регрессии.

RESEARCH OF RHEOLOGICAL AND STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES OF A BIOPOLYMER SYSTEM UNDER HIGH TEMPERATURE CONDITIONS

M.A. Myslyuk¹, N.R. Zholob²

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, ²LLC "Geosynthesis Engineering")

Rheological and structural-mechanical properties of the biopolymer system with the additives (weight %) of xanthan gum (0,2–0,4), extruded starch (1,5–2,5), carbonate filler (25), organic-mineral bridging agent Alevron® (0,5), sodium formate (50) and potassium formate (10–230) under temperatures of 25 and 130–170 °C were studied. It is shown that the rheological models most adequate for various combinations of variable factors are those of Hersche – Bulkley, Casson – Shulman, Ostwald and some bi-viscous fluid models. Herschel – Bulkley model is the most appropriate one for experiments planning.

The regression equations used for forecasting of rheological and structural-mechanical properties of the biopolymer system, depending on composition and temperature, are built. The results of the analysis of rheological and structural-mechanical properties are presented.

Keywords: biopolymer system; bi-viscous fluid; rheological properties; rotational viscosimetry; structural-mechanical properties; regression equation.

В настоящее время для вскрытия продуктивных пластов успешно применяют безглинистые биополимерные системы [1–4], эффективность которых определяется специфическими особенностями их технологических свойств (высокая псевдопластичность, мгновенная тиксотропия, низкая фильтрация), а также способностью к биологической деструкции полимерных компонентов и растворению кислотой твердой фазы. Это создает условия для проходки интервалов ствола скважин без осложнений, сохранения естественной проницаемости продуктивных пластов и минимизации техногенного влияния на окружающую среду [3, 4].

Разнообразие горно-геологических условий бурения скважин определяет требования к технологическим свойствам и составу биополимерных систем. В этом плане весьма важным является выбор рецептур для вскрытия продуктивных пластов с высокими давлениями и температурами, определяющими плотность и термостойкость биополимерных систем. Решение

задачи выбора оптимальной рецептуры бурового раствора базируется на информации о влиянии концентраций реагентов, температуры и других факторов на показатели его технологических свойств.

Биополимерная система Биокар-МТ, в состав которой входят комплексный полимерный реагент Биокар-компаунд, ингибиторы (хлориды калия и натрия) и органо-минеральный коагумент Alevron®, может использоваться с предельной плотностью 1360 или 1480 кг/м³ (при использовании соответственно хлорида и нитрата кальция) для бурения скважин при температурах до 150 °С [3].

В работе [5] изучена термостойкость крахмала с формиатами (солями муравьиной кислоты) калия и натрия при температурах до 180 °С и показана возможность их применения для бурения скважин при температурах до 150 °С. Отмечено влияние формиатов натрия и калия на конформацию макромолекул полисахаридных реагентов, что способствует сохранению упорядоченного состояния биополимерных си-

План эксперимента для исследования свойств биополимерной системы

Опыт	$T, ^\circ\text{C}$	$c_b, \%$	$c_s, \%$	$c_f, \%$
1	130	0,30	2,00	120
2	130	0,35	2,25	175
3	170	0,35	1,50	65
4	170	0,30	2,50	10
5	140	0,35	1,75	10
6	150	0,35	2,50	120
7	160	0,30	1,75	175
8	160	0,20	2,50	65
9	160	0,35	2,00	230
10	130	0,25	1,75	65
11	160	0,40	2,25	10
12	130	0,40	2,50	230
13	150	0,40	1,50	175
14	150	0,20	1,75	230
15	160	0,25	1,50	120
16	170	0,25	2,25	230
17	140	0,30	1,50	230
18	170	0,20	2,00	175
19	130	0,20	1,50	10
20	140	0,40	2,00	65
21	170	0,40	1,75	120
22	150	0,25	2,00	10
23	140	0,25	2,50	175
24	140	0,20	2,25	120
25	150	0,30	2,25	65

стем в условиях высоких температур [5–8]. Плотность таких систем может составлять 1570 кг/м³.

Ниже изучены реологические и структурно-механические свойства биополимерной системы при температурах 130–170 °С для различных концентраций исходных реагентов с целью обоснования рецептуры для вскрытия продуктивных горизонтов в условиях высоких температур и давлений.

Материалы и методика исследований

Для биополимерной системы использовались ксантановая камедь, крахмальный реагент, карбонатный наполнитель, органо-минеральный коьматант Alevgon®, формиаты натрия и калия.

Ксантановая камедь является структурообразователем, представляет собой полисахарид, полученный ферментацией с использованием бактерии *Xanthomonas Campestris*, и предназначена для регулирования реологических и структурно-механических свойств [9]. Экструзионный крахмал в соответствии с ТУ У 00383403.001–98 используется для регулирования фильтрации, а формиаты натрия и калия – для повышения ингибирующих свойств и плотности минерализованной биополимерной системы. Наполнитель КН-50 (ТУ У 14.1-34962841-001:2008) представлен карбонатными частицами различного фракционного состава. Органо-минеральный коьматант Alevgon® (ТУ У 20.1-34962841-009:2014) является тонкодисперсной смесью малорастворимых белковых веществ растительного происхождения, выполняет функции дополнительного термостабилизирующего реагента, который улучшает показатели реологических свойств системы при высоких температурах, способствует уплотнению фильтрационной корки и ограничивает фильтрацию в пластовых условиях [10–12].

На основании результатов пробных экспериментов обоснованы переменные факторы в рецептуре биополимерной системы и уровни их изменения. Концентрация формиата натрия принята постоянной 50 %, что обеспечивает плотность на уровне 1230 кг/м³ и значительно снижает стоимость биополимерной системы. Концентрация (% мас.) ксантановой камеди c_b изменялась в пределах 0,20–0,40, крахмала $c_s = 1,50$ –2,50 и формиата калия $c_f = 10$ –230. Содержания коьматанта Alevgon® и карбонатного наполнителя приняты постоянными на уровнях 0,50 и 25 % соответственно.

Исследования свойств биополимерной системы выполнены с помощью латинского плана эксперимента для четырех факторов (температура T , концентрации реагентов c_b , c_s и c_f), изменяющихся на пяти уровнях (табл. 1). Изучались технологические (в т. ч. реологические и структурно-механические) свойства рецептур при температуре 25 °С, а также реологические и структурно-механические свойства в условиях высоких температур по плану эксперимента (см. табл. 1). Измерения свойств выполнялись с учетом рандомизации опытов после термостатирования проб биополимерной системы в течение 2 ч при температуре 85 °С.

Реологические и структурно-механические свойства биополимерной системы изучались с помощью ротационного вискозиметра OFITE 1100, моделирующего течение Куэтта в зазоре между коаксиальными цилиндрами. Частоты вращения ω , мин⁻¹ – 3, 6, 30, 60, 100, 200, 300, 600. Относительный зазор $\alpha = R_b/R_n = 0,9365$, где R_b , R_n – радиусы соответственно внутреннего и наружного цилиндров. Для предупреждения кипения биополимерной системы при высоких температурах измерения проводились с постоянным давлением 3 МПа.

Обработка данных ротационной вискозиметрии выполнена с помощью методики [13–16], основанной на строгом решении основного уравнения ротационной вискозиметрии в классе $\mathcal{B}$ реологически стационарных моделей, допускающих явное аналитическое представление вида $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau)$, и учитывающей информационную содержательность опытов ($\dot{\gamma}$, τ – соответственно градиент скорости и напряжение сдвига). Класс $\mathcal{B}$ включает модели Ньютона ($v = 1$), Бингама ($v = 2$), Оствальда ($v = 3$), Гершеля – Балкли ($v = 4$), Шульмана – Кессона ($v = 5$) и бивязские модели ($v = 6$ –13) вида [15, 16]

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \dot{\gamma}(\tau, a^{(1)}), & \tau \leq \tau^*; \\ \dot{\gamma}(\tau, a^{(2)}), & \tau > \tau^*, \end{cases} \quad (1)$$

где $a^{(1)}$, $a^{(2)}$ – реологические свойства моделей для низких и высоких градиентов скоростей сдвига; τ^* – граничное напряжение сдвига, определяемое из реше-

ния уравнения $\dot{\gamma}(\tau^*, a^{(1)}) = \dot{\gamma}(\tau^*, a^{(2)})$. В бивязках моделях (1) включены произвольные комбинации моделей Ньютона, Бингама и Оствальда.

Обработка данных для плана эксперимента формализована в виде поиска наиболее адекватной реологической модели с помощью процедур [13, 14, 16]:

$$\min_{a_j^v} \|\tau - A(\omega, a_j^v)\| \Rightarrow \hat{a}_j^v, v \in \mathfrak{V}, j = \overline{1, M}; \quad (2)$$

$$\min_v \left(\hat{\sigma}_{cv}^2 = \frac{1}{M(N-r_v)} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (\tau_i - A(\omega_i, a_j^v))^2 \right) \Rightarrow \hat{v}, \quad (3)$$

где $\tau = \{\tau_i\}$, $\omega = \{\omega_i\}$, $i = \overline{1, N}$ – векторы измерений напряжений сдвига и скоростей вращения наружного цилиндра; $A(\omega, a^v)$ – оператор прямой задачи ротационной вискозиметрии для v -й реологической модели; $\hat{\sigma}_{cv}^2$ – оценка дисперсии адекватности v -й модели по данным матрицы плана эксперимента M ; r_v – количество оцениваемых параметров v -й реологической модели.

Процедура (2) предназначена для построения оценок $\hat{a}_j^v$ реологических свойств моделей v из класса $\mathfrak{V}$, а процедура (3) – для выбора наиболее адекватной $\hat{v}$ реологической модели плана эксперимента M [13, 16]. В основу этих процедур положен принцип максимума функции правдоподобия [13].

Показатели статического напряжения сдвига (СНС) через 10 с (θ_{10s}) и 10 мин (θ_{10}) определены при частоте вращения наружного цилиндра 3 мин⁻¹.

Технологические свойства

В табл. 2 приведены результаты измерений показателей технологических свойств исследуемых рецептур биополимерной системы (см. табл. 1) при комнатной температуре 25 °С. Из табл. 2 следует, что в пределах области планирования эксперимента биополимерная система характеризуется плотностью $\rho = 1420\text{--}1650$ кг/м³, условной вязкостью $T_{100} = 15\text{--}59$ с, статическим напряжением сдвига $\theta_{10s} = 2,4\text{--}6,7$ Па и $\theta_{10} = 3,8\text{--}21,1$ Па, показателем фильтрации API $\Phi = 0\text{--}1$ см³/30 мин, показателем pH 8,30–10,95.

На основании экспериментальных данных получено уравнение для оценки плотности биополимерной системы

$$\rho = 1411 + 1,055c_f, \quad (4)$$

оценка дисперсии адекватности которого составляет $\sigma_p^2 = 8,696$ (кг/м³)². Для области планирования эксперимента показатели c_b и c_s не оказывают значимого влияния на ρ .

В табл. 2 приведены оценки реологических свойств (динамического напряжения сдвига τ_0 , меры консистенции k и показателя нелинейности n), наиболее адекватных для плана M эксперимента в соответствии с процедурой (3) модели Гершеля – Балкли ($\hat{\sigma}_{c4}^2 = 0,0544$ Па²) при постоянной температуре 25 °С; для других реологических моделей – бивязка Оствальда и Оствальда ($\hat{\sigma}_{c10}^2 = 0,2877$ Па²), Оствальда ($\hat{\sigma}_{c3}^2 = 0,7430$ Па²), Шульмана – Кессона ($\hat{\sigma}_{c5}^2 = 0,8621$ Па²), бивязка Бингама и Бингама ($\hat{\sigma}_{c9}^2 = 4,2070$ Па²) и др. Для каждой рецептуры плана M наиболее адекватными являются реологические модели: Гершеля – Балкли (19 рецептур), Шульмана – Кессона (2 рецептуры), Оствальда (1 рецептура), бивязкой жидкости Оствальда и Оствальда (3 рецептуры).

Ниже приведены некоторые результаты корреляционного анализа данных табл. 2: оценки коэффициентов корреляций r_{xy} между показателями реологических (структурно-механических) x и технологических y свойств биополимерной системы, критерии K для проверки статистических гипотез $H_0: \rho_{xy} = 0$ (здесь ρ_{xy} – истинное значение коэффициента корреляции).

Таблица 2

Технологические свойства биополимерной системы при 25 °С

Опыт	Плотность ρ , кг/м ³	Условная вязкость T_{100} , с	Фильтрация Φ , см ³ /30 мин	$\hat{\tau}_0$, Па	$\hat{k}$, Па·с ^{n}	$\hat{n}$	$\theta_{10s/10}$, Па	pH
1	1540	27	0	2,204	0,5383	0,7608	3,8/12,0	10,24
2	1600	29	0	1,148	0,5509	0,7567	3,8/14,8	10,59
3	1480	24	0,9	2,899	0,5108	0,7005	5,7/18,2	9,36
4	1420	27	0,9	2,081	0,8445	0,6380	4,8/6,2	8,30
5	1420	25	1,0	2,991	0,7759	0,6294	5,7/11,0	8,45
6	1540	45	0	1,903	0,8777	0,7006	5,7/13,9	10,14
7	1600	33	0	1,415	0,5800	0,7432	4,3/9,6	10,67
8	1480	28	0	1,232	0,5708	0,6904	4,3/11,0	9,57
9	1650	44	0	1,506	0,7254	0,7384	4,8/11,0	10,95
10	1480	18	0,2	1,683	0,3645	0,7402	3,8/11,5	9,50
11	1420	30	0,9	2,930	1,1400	0,6225	6,7/21,1	8,45
12	1650	49	0	1,475	0,9663	0,7262	5,3/16,8	10,76
13	1600	59	0	2,331	0,9485	0,7203	5,7/11,0	10,56
14	1650	36	0	0,766	0,5091	0,7757	2,9/4,3	11,01
15	1540	19	0,2	1,228	0,3595	0,7548	2,9/9,1	10,16
16	1650	40	0	0,927	0,7272	0,7441	3,8/6,2	10,92
17	1650	35	0	1,198	0,6637	0,7319	3,8/8,6	10,86
18	1600	25	0	1,042	0,3862	0,7992	2,4/4,3	10,58
19	1420	15	1,0	1,599	0,4781	0,6583	2,9/3,8	8,43
20	1480	28	0,4	3,399	0,7359	0,6651	6,7/20,6	9,43
21	1540	32	0,2	2,461	0,7503	0,7077	5,3/13,4	10,08
22	1420	18	0,3	1,800	0,6636	0,6486	3,8/4,8	8,32
23	1600	36	0	0,660	0,7041	0,7445	3,3/5,7	10,47
24	1540	21	0	1,192	0,3955	0,7706	2,4/5,7	10,10
25	1480	24	0,1	2,075	0,4549	0,7338	4,8/14,8	9,51

	ρ	T_{100}	Φ	pH
r_{τ_0}/K	-0,610/4,853	-0,080/0,400	0,618/4,995	-0,580/4,376
r_{η}/K	-0,021/0,106	0,641/5,433	0,205/1,071	-0,134/0,681
r_{η}/K	0,767/9,334	0,165/0,848	-0,785/10,231	0,845/14,728
$r_{\theta_{10s}}/K$	-0,291/1,588	0,374/2,172	0,366/2,112	-0,298/1,637
$r_{\theta_{10}}/K$	-0,174/0,897	0,176/0,911	0,176/0,910	-0,112/0,568

Из этих результатов следует статистически значимая корреляционная связь ($K > u_{\alpha/2}$) между отдельными показателями реологических (структурно-механических) и технологических свойств: динамическим напряжением сдвига τ_0 и ρ , τ_0 и Φ , τ_0 и pH, мерой консистенции k и T_{100} , показателем нелинейности n и ρ , n и Φ и т. п. Здесь $u_{\alpha/2}$ – квантиль стандартизированного нормального распределения с доверительной вероятностью α , для $\alpha = 0,05$ имеем $u_{\alpha/2} = 1,96$.

Реологические свойства

В табл. 3 приведены исходные данные и результаты обработки данных ротационной вискозиметрии с помощью процедур (2) и (3) для рецептур плана эксперимента (см. табл. 1). Отметим, что наиболее адекватными для отдельных рецептур плана M эксперимента являются реологические модели: Гершеля – Балкли (18 рецептур), Шульмана – Кессона (4 рецептуры), бивязких жидкостей Бингама и Бингама (2 ре-

цептуры), Бингама и Оствальда (1 рецептура). На рис. 1 показаны реологические кривые для некоторых рецептур плана M с разными наиболее адекватными моделями, которые свидетельствуют о высокой степени соответствия экспериментальных и сглаженных данных для оценок параметров $\hat{a}_j^v$ моделей $v \in \Theta$ с помощью процедуры (2).

Для плана M эксперимента наиболее адекватной $\hat{v}$ реологической моделью в соответствии с процедурой (3) является модель Гершеля – Балкли ($\hat{\sigma}_{e4}^2 = 0,1374 \text{ Па}^2$), для других реологических моделей: Оствальда ($\hat{\sigma}_{e3}^2 = 0,4333 \text{ Па}^2$), Шульмана – Кессона ($\hat{\sigma}_{e5}^2 = 0,7815 \text{ Па}^2$), Бингама ($\hat{\sigma}_{e2}^2 = 2,863 \text{ Па}^2$) и Ньютона ($\hat{\sigma}_{e1}^2 = 13,4 \text{ Па}^2$). Бивязкие модели не описывают данные эксперимента. Полученные результаты согласуются с ранее выполненными исследованиями для биополимерной системы Биокар [10].

Регрессионные модели $a^v(T, c_b, c_s, c_f)$ построены в классе полиномов второго порядка [11, 12]

$$a^v(T, c_b, c_s, c_f) = Bb(T, c_b, c_s, c_f), \quad (5)$$

где $b(T, c_b, c_s, c_f) = (1, T, c_b, c_s, c_f, Tc_b, \dots, T^2, c_b^2, c_s^2, c_f^2)^T$ – вектор базисных функций полиномиальной модели (табл. 4). Оценки $\hat{B}$ параметров в (5) определяли для наиболее адекватной $\hat{v}$ реологической модели Гершеля – Балкли при различных сочетаниях E базисных функций из условия минимума дисперсии адекватности

Таблица 3

Реологические и структурно-механические свойства биополимерной системы при 130–170 °С

Опыт	Углы закручивания пружины вискозиметра при частотах вращения ω , мин ⁻¹								Оценки реологических свойств наиболее адекватной модели Гершеля – Балкли				Показатели СНС, Па	
	3	6	30	60	100	200	300	600	$\hat{\tau}_0$, Па	$\hat{k}$, Па·с ⁿ	$\hat{n}$	$\hat{\sigma}_v^2$, Па ²	θ_{10s}	θ_{10}
1	4,7	6,1	14,7	20,2	24,8	34,7	43,8	68,4	1,197	0,5028	0,6007	0,5077	2,9	3,3
2	5,2	6,7	15,7	21,6	27,1	37,9	49,1	71,3	0,925	0,7018	0,5614	0,1842	3,0	3,5
3	6,8	7,5	11,9	15,2	17,9	23,4	27,9	39,1	2,355	0,4034	0,5384	0,0330	0,9	1,1
4	2,5	2,6	3,1	3,7	4,8	6,8	8,8	13,2	1,070	0,0204	0,8095	0,0091	1,0	1,0
5	5,3	6,1	10,9	14,9	18,8	25,6	31,5	47,6	1,800	0,3146	0,6107	0,0737	1,8	2,3
6	4,6	5,4	10,4	15,1	19,2	28,2	36,8	62,2	2,021	0,1377	0,7716	0,2232	2,5	2,9
7	4,3	5,1	10,2	14,7	18,4	25,7	31,3	51,7	1,689	0,2175	0,6770	0,3671	1,8	2,0
8	4,1	4,2	5,4	6,9	8,8	13,7	17,4	25,7	1,577	0,0648	0,7463	0,0668	1,9	1,9
9	5,9	6,9	13,4	17,5	22,1	31,6	40,2	64,7	2,481	0,2181	0,7084	0,2434	2,8	3,1
10	5,1	5,9	11,4	15,3	18,7	25,6	31,4	48,6	1,852	0,2957	0,6219	0,1959	2,3	2,5
11	3,7	4,3	7,5	10,9	14,8	21,9	29,7	44,3	1,109	0,1900	0,6802	0,0792	1,8	1,9
12	5,5	7,5	17,5	23,4	30,4	46,7	60,7	90,4	1,243	0,5880	0,6224	0,2027	3,1	4,2
13	6,2	7,8	14,7	19,3	21,1	32,8	41,0	61,8	2,178	0,4257	0,6053	0,1927	2,5	2,7
14	3,4	4,1	9,2	13,7	17,7	25,0	31,5	48,8	0,817	0,3279	0,6151	0,0873	1,6	1,9
15	3,2	3,8	8,4	12,0	15,5	21,9	27,0	39,2	0,424	0,4439	0,5419	0,0078	1,2	1,4
16	3,5	3,9	7,1	10,5	15,0	22,7	29,3	47,2	1,111	0,1484	0,7247	0,0248	1,8	2,0
17	4,2	5,5	13,9	19,2	24,2	34,0	41,6	63,3	0,669	0,6383	0,5573	0,2599	2,3	3,0
18	1,7	1,9	3,3	5,0	7,7	13,6	18,0	28,2	0,334	0,0825	0,7409	0,1056	0,8	1,1
19	3,7	4,2	7,5	10,4	13,8	18,8	23,1	33,6	0,968	0,3003	0,5707	0,0163	1,6	1,8
20	5,2	6,1	11,2	15,2	19,8	28,9	37,0	57,2	1,860	0,2436	0,6773	0,0146	2,4	2,6
21	3,3	4,1	8,0	11,8	16,7	24,2	31,1	46,8	0,706	0,2927	0,6276	0,0336	1,5	1,9
22	2,0	2,5	4,4	6,3	8,7	14,5	19,0	27,2	0,379	0,1569	0,6421	0,1260	1,2	1,2
23	4,3	5,1	10,1	15,0	19,2	27,9	36,4	60,7	1,774	0,1625	0,7450	0,2096	2,1	2,3
24	2,0	2,5	6,0	10,2	14,7	22,7	28,6	47,1	0,302	0,1968	0,6882	0,0713	1,5	1,6
25	2,0	2,9	5,8	9,1	13,6	22,4	27,7	46,2	0,460	0,1545	0,7199	0,0987	1,5	1,7

Примечание. Постоянная прибора 0,5107 Па/град.

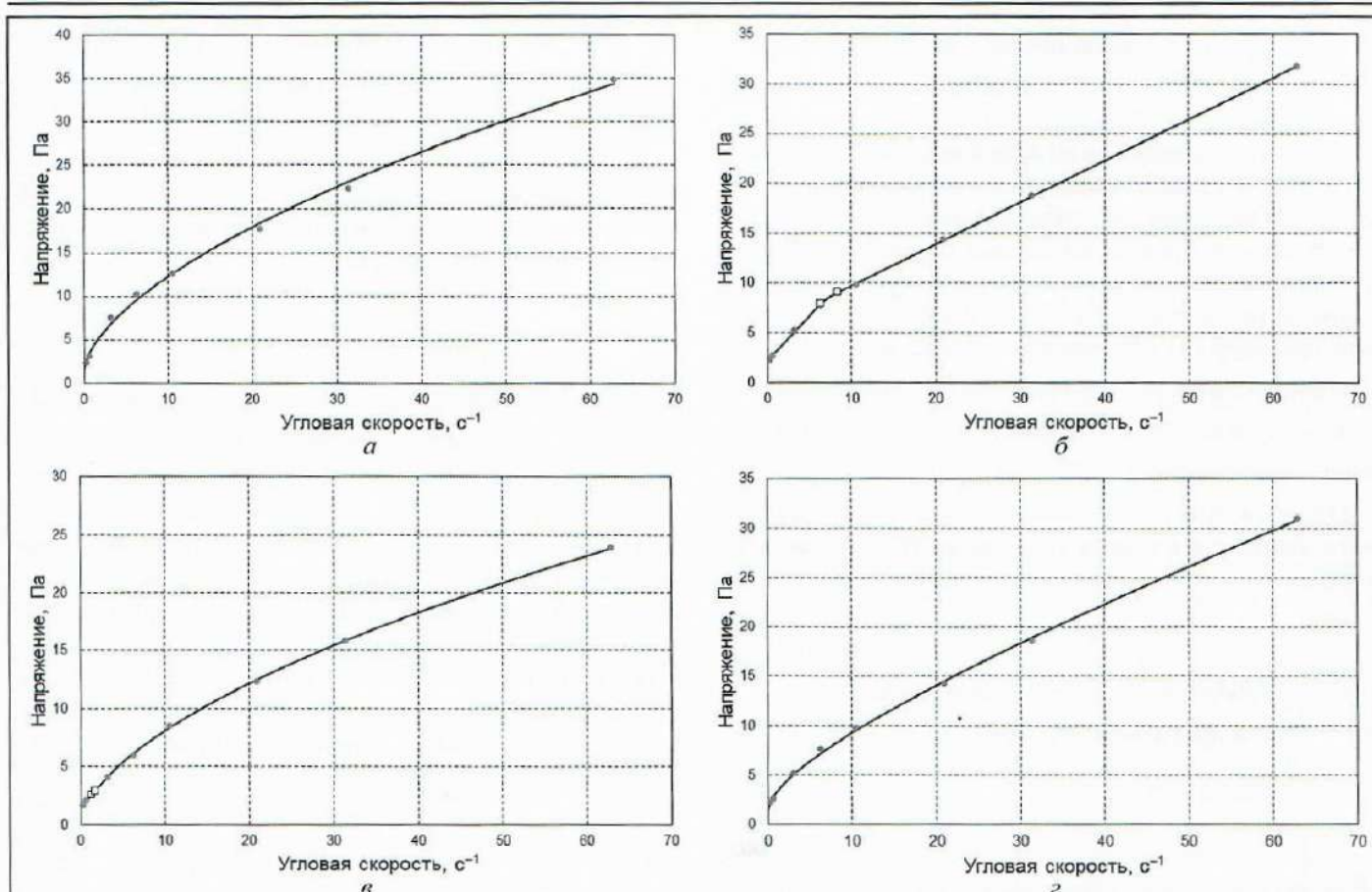


Рис. 1. Реологические кривые:

а – модель Гершеля – Балкли, опыт 1; б – бивязка модель Бингама и Бингама, опыт 6; в – бивязка модель Бингама и Оствальда, опыт 21; з – модель Шульмана – Кессона, опыт 23

Таблица 4

Параметры уравнений состояния показателей реологических свойств биополимерной системы

Базисные функции b_i	Параметры модели	Значения параметров $\hat{B}_{ji}$ модели для реологических свойств					
		$T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$			$T = 130\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$		
		$\tau_0, \text{Па}$	$k, \text{Па}\cdot\text{с}^n$	n	$\tau_0, \text{Па}$	$k, \text{Па}\cdot\text{с}^n$	n
1	B_{i1}	-3,667	2,773	-0,386	11,110	3,736	-0,842
T	$B_{i2}\cdot 10^2$	—	—	—	-4,239	-5,460	-0,299
c_b	B_{i3}	14,450	-5,941	0,104	21,397	3,830	0,089
c_s	B_{i4}	3,060	-1,866	0,282	-8,272	0,127	-0,075
c_f	$B_{i5}\cdot 10^2$	-0,069	-1,468	—	-4,327	0,969	-0,359
Tc_b	B_{i6}	—	—	—	—	-0,023	—
Tc_s	$B_{i7}\cdot 10^3$	—	—	—	—	-2,792	—
Tc_f	$B_{i8}\cdot 10^4$	—	—	—	3,054	-0,602	0,361
$c_b c_s$	B_{i9}	-2,681	1,765	—	-7,365	—	-0,03
$c_b c_f$	$B_{i10}\cdot 10^3$	-0,017	0,040	-0,073	-7,505	—	0,1383
$c_s c_f$	$B_{i11}\cdot 10^4$	—	58,540	—	—	—	-9,631
T^2	$B_{i12}\cdot 10^4$	—	—	—	—	2,253	—
c_b^2	B_{i13}	—	8,156	1,434	—	—	—
c_s^2	B_{i14}	-0,661	0,408	-0,581	2,689	—	0,100
c_f^2	$B_{i15}\cdot 10^5$	—	1,724	-0,405	—	—	—
$Tc_b c_s$	B_{i16}	—	—	—	—	—	—
$Tc_b c_f$	B_{i17}	—	—	—	—	—	—
$Tc_s c_f$	B_{i18}	—	—	—	—	—	—
$c_b c_s c_f$	B_{i19}	—	-0,022	—	—	—	—
$Tc_b c_s c_f$	$B_{i20}\cdot 10^4$	—	—	—	—	—	—
Дисперсия адекватности модели, Па^2		0,062	$7,49\cdot 10^{-3}$	$2,55\cdot 10^{-4}$	0,365	$5,66\cdot 10^{-3}$	$1,12\cdot 10^{-3}$

$$\min \left\{ \sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{n-r_{\varepsilon}} \sum_{i=1}^n [B_j b(T_i, c_{bi}, c_{si}, c_{fi}) - \hat{a}_{ji}^y]^2 \right\} \Rightarrow \{\hat{B}_j, \hat{\varepsilon}\}, \varepsilon \in E, \quad (6)$$

где r_{ε} – количество оцениваемых параметров в моделях (5); $\hat{B}_j$ – j -я строка матрицы $\hat{B}$ параметров модели (5); $T_i, c_{bi}, c_{si}, c_{fi}$ – данные плана эксперимента (см.

табл. 1); $\hat{a}_{ji}^v$ – результаты оценок j -го показателя реологических свойств в i -м опыте плана эксперимента (см. табл. 3).

Класс Е сформирован из линейной части полинома с включением комбинаций произведений и квадратов исходных факторов (см. табл. 3) и составил 575 моделей. В табл. 4 приведены оценки параметров и дисперсий адекватности уравнений регрессии (5) для показателей реологических свойств, построенные с помощью процедур (6) при температурах 25 и 130–170 °С. Единицы измерений параметров $\hat{B}_{ji}$ уравнений состояний соответствуют принятым единицам измерений факторов (табл. 1) и показателей $\hat{a}_j^v$ (табл. 3).

Отметим, что в отдельных случаях для динамического напряжения сдвига уравнение (5) представляется в виде

$$\hat{a}_1^v(T, c_b, c_s, c_f) = \begin{cases} \hat{B}_1 b(T, c_b, c_s, c_f), & \text{если } \hat{a}_1^v(T, c_b, c_s, c_f) \geq 0; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $\hat{B}_1$ – 1-я строка матрицы $\hat{B}$. Это позволяет использовать методы аппроксимации данных (6) для получения объективных оценок параметра $\hat{\tau}_0$.

Представляют интерес результаты корреляционного анализа показателей реологических свойств от факторов плана эксперимента, из которых следует статистически значимая связь: τ_0 и c_b , k и T , k и c_s , k и c_f , n и T , n и c_s .

	T	c_b	c_s	c_f
$r_{\tau_0, y}/K$	-0,014/0,070	0,442/2,751	-0,034/0,168	0,034/0,173
$r_{k, y}/K$	-0,531/3,693	0,338/1,907	-0,407/2,438	-0,370/2,145
$r_{n, y}/K$	0,380/2,217	-0,144/0,738	-0,751/8,604	-0,055/0,275

На рис. 2 показано влияние концентраций ксантановой камеди и формиата калия на зависимость показателей реологических свойств наиболее адекватной реологической модели от температуры. Для динамического напряжения сдвига (рис. 2, а) и показателя нелинейности (рис. 2, б) эти зависимости линейные, а для меры консистенции (рис. 2, в) характерна нели-

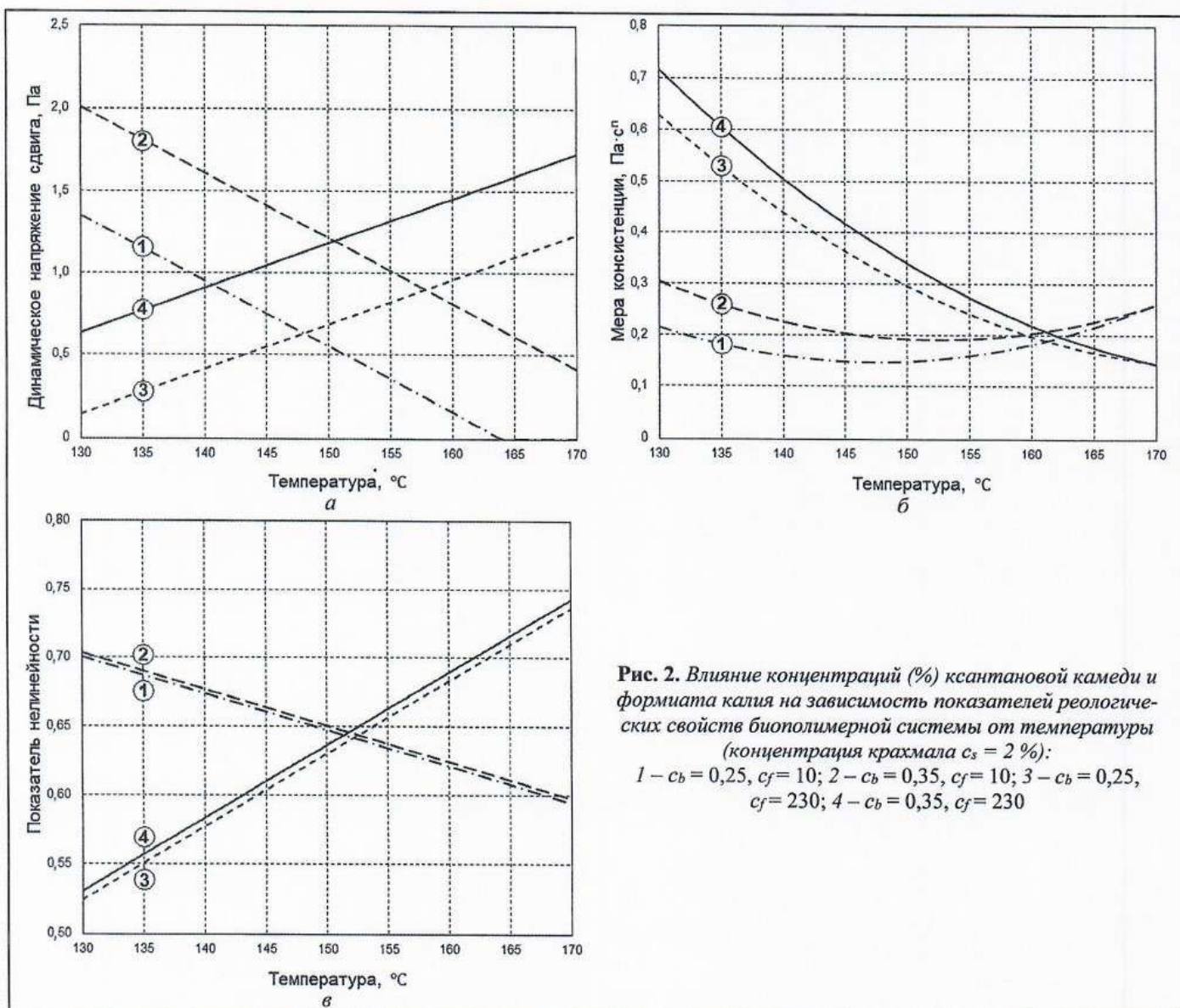


Рис. 2. Влияние концентраций (%) ксантановой камеди и формиата калия на зависимость показателей реологических свойств биополимерной системы от температуры (концентрация крахмала $c_s = 2\%$):
1 – $c_b = 0,25$, $c_f = 10$; 2 – $c_b = 0,35$, $c_f = 10$; 3 – $c_b = 0,25$, $c_f = 230$; 4 – $c_b = 0,35$, $c_f = 230$

нейная тенденция ее изменения. Отметим, что для высоких концентраций формиата калия влияние температуры на вязкостные свойства (меру консистенции) интенсивнее, чем для низких. Область изменения показателей реологических свойств характеризует эффективную выносную способность биополимерной системы при температурах 130–170 °С.

Структурно-механические свойства

В табл. 3 приведены результаты измерений показателей СНС для рецептур биополимерной системы плана М эксперимента, на основании которых построены уравнения регрессии вида (5) для показателей СНС θ_{10s} и θ_{10} при температурах 25 и 130–170 °С (табл. 5).

На рис. 3 для фиксированных температур 130 и 170 °С, а также концентрации крахмального реагента $c_s = 2\%$ показаны зависимости $\theta(c_b, c_s, c_f) = idem$, которые иллюстрируют допустимую область Ω_θ концентраций ксантановой камеди и формиата калия

$$\Omega_\theta(c_b, c_f): \theta^{\min} \leq \theta \leq \theta^{\max}, c_b^{\min} \leq c_b \leq c_b^{\max}, c_f^{\min} \leq c_f \leq c_f^{\max},$$

где $\theta^{\min}, \theta^{\max}, c_b^{\min}, c_b^{\max}, c_f^{\min}, c_f^{\max}$ – ограничения на показатели СНС и концентраций реагентов по плану эксперимента. На рис. 3 допустимые области $\Omega_\theta(c_b, c_f) \geq \theta_{10s}^{\min} = 1,8 \text{ Па}$ и $\Omega_\theta(c_b, c_f) \geq \theta_{10}^{\min} = 2 \text{ Па}$ выделены. Для температуры 130 °С область планирования эксперимента соответствует допустимым обла-

стям $\Omega_\theta(c_b, c_f)$ для показателей θ_{10s} и θ_{10} (рис. 3, а, в), а для температуры 170 °С – допустимые области существенно уменьшаются к высоким концентрациям ксантановой камеди и формиата калия.

Результаты корреляционного анализа показателей СНС и факторов плана эксперимента указывают на статистически значимую связь: θ_{10s} и T , θ_{10s} и c_b, θ_{10s} и c_f , θ_{10} и T , θ_{10} и c_b, θ_{10} и c_f .

	T	c_b	c_s	c_f
$r_{\theta_{10s}, T}/K$	-0,629/5,201	0,445/2,779	0,210/1,096	0,419/2,543
$r_{\theta_{10}, T}/K$	-0,631/5,252	0,476/3,080	0,166/0,852	0,487/3,190

Выводы

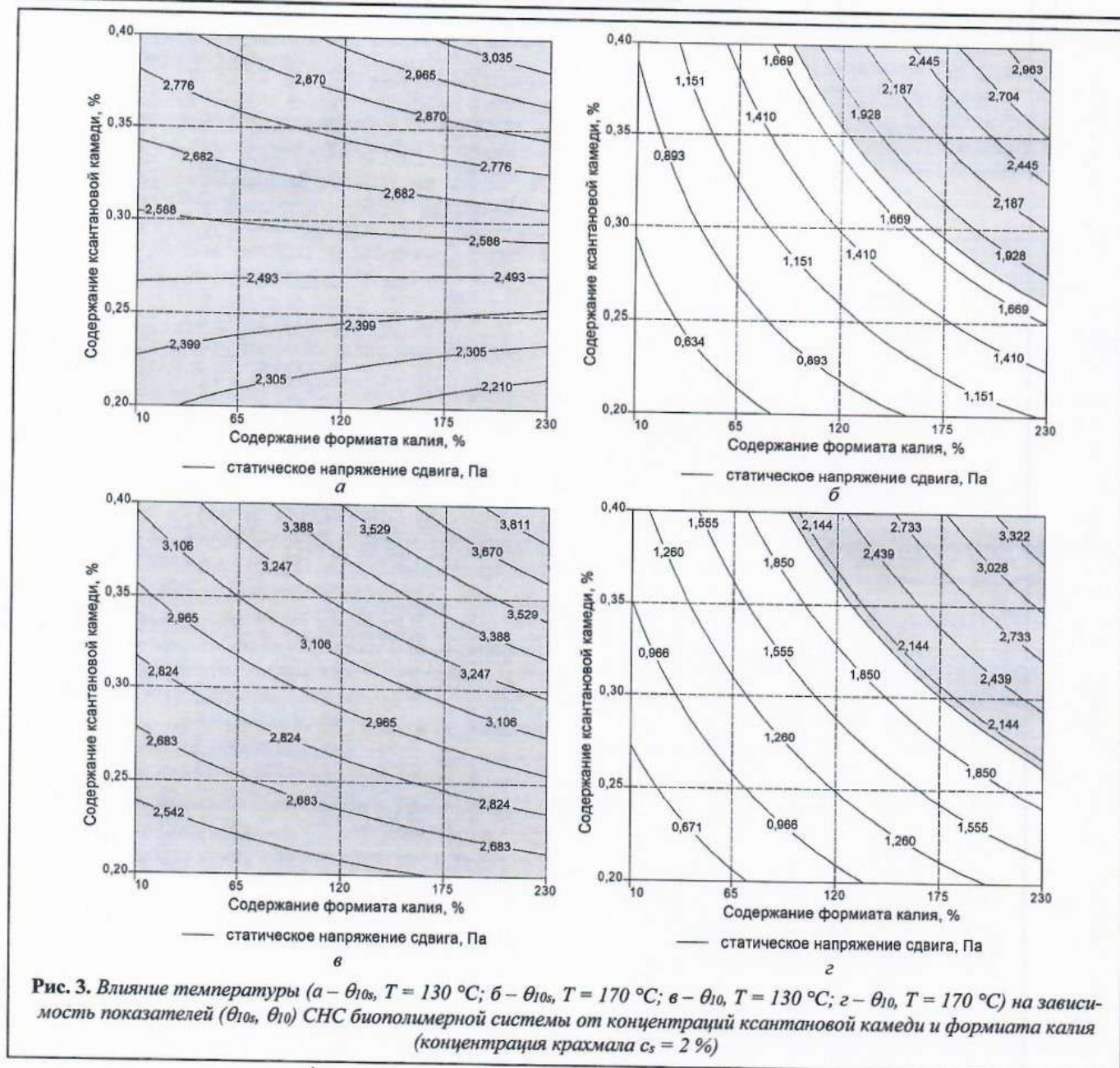
Изучены реологические и структурно-механические свойства биополимерной системы, включающей (мас. %) ксантановую камедь (0,2–0,4), экструзионный крахмал (1,5–2,5), карбонатный наполнитель (25), органо-минеральный коагулянт Alevron® (0,5), формиаты натрия (50) и калия (10–230), при температурах 25 и 130–170 °С. Показано, что для таких систем наиболее адекватна реологическая модель Гершеля – Балкли. Установлено, что реологические и структурно-механические свойства биополимерной системы отвечают функциональным требованиям, обусловленным ее выносной способностью и седиментационной устойчивостью.

Построены регрессионные зависимости показателей реологических и структурно-механических свойств от концентраций реагентов при температурах

Таблица 5

Параметры уравнений состояния показателей структурно-механических свойств биополимерной системы

Базисные функции b_i	Параметры модели	Значения параметров $\hat{B}_{ji}$ модели			
		$T = 25\text{ °С}$		$T = 130\text{--}170\text{ °С}$	
		θ_{10s}	θ_{10}	θ_{10s}	θ_{10}
1	B_{11}	-1,612	8,152	10,778	16,656
T	B_{12}	—	—	-0,151	-0,205
c_b	B_{13}	17,511	3,704	11,420	7,106
c_s	B_{14}	0,721	-7,420	2,501	1,538
c_f	$B_{15} \cdot 10^3$	-3,470	49,173	30,723	26,243
Tc_b	B_{16}	—	—	—	—
Tc_s	B_{17}	—	—	—	—
Tc_f	B_{18}	—	—	—	—
$c_b c_s$	B_{19}	—	29,692	-4,529	-1,821
$c_b c_f$	B_{110}	—	—	-0,061	-0,047
$c_s c_f$	B_{111}	—	—	-0,017	-0,014
T^2	$B_{112} \cdot 10^4$	—	—	3,362	5,128
c_b^2	B_{113}	—	—	—	—
c_s^2	B_{114}	—	—	—	—
c_f^2	$B_{115} \cdot 10^3$	2,102	-25,142	—	—
$Tc_b c_s$	B_{116}	—	—	—	—
$Tc_b c_f$	B_{117}	—	—	—	—
$Tc_s c_f$	B_{118}	—	—	—	—
$c_b c_s c_f$	B_{119}	-0,010	—	—	—
$Tc_b c_s c_f$	$B_{120} \cdot 10^4$	—	—	2,805	2,346
Дисперсия адекватности модели, Па^2		0,251	8,722	0,072	0,071



25 и 130–170 °C, которые могут быть использованы в качестве информационного обеспечения задачи выбора оптимальных рецептур биополимерной системы для конкретных горно-геологических условий бурения с учетом термобарических условий скважины. Приведены результаты корреляционного анализа влияния концентраций реагентов и температуры на показатели свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение биополимерных растворов для проводки горизонтальных скважин / М. Синьют, Л. Гриб, Дж.Э. Троуик, М. Дадли // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1990. – № 1. – С. 16–20.
2. Крылов В.И., Крецул В.В. Особенности технологии промывки горизонтальных скважин // Нефть. хоз-во. – 2001. – № 6. – С. 36–40.
3. Лубан Ю.В. Застосування безглинистих промивальних рідин в умовах високих пластів їх тисків і температур // Ю.В. Лубан, С.В. Лубан, В.В. Дудич [та ін.] // Нафтогазова галузь України. – 2013. – № 2. – С. 18–22.
4. О применении биополимерной системы "Биокар" для вскрытия низкопроницаемых продуктивных пластов / М.А. Мыслик, Ю.М. Салыжсин, В.В. Богославец, Ю.В. Лубан // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. – № 3. – С. 35–39.
5. Valizadeh M., Nasiri A.R. Improving Thermal Stability of Starch in Formate Fluids for Drilling High Temperature Shales // Journal of petroleum science and technology. – 2012. – Vol. 2, Issue 1. – P. 61–64. – DOI: 10.22078/JPST.2012.98
6. Downs J.D. High Temperature Stabilisation of Xanthan in Drilling Fluids by the Use of Formate Salts // Physical Chemistry of Colloids and Interfaces in Oil Production: Proceedings of the 6th IFP Exploration and Production Research Conference, Saint-Raphaël, September 4–6. – Paris: Editions Technip, 1992. – P. 197–202.
7. Potassium Formate Milling Fluid Breaks the 400° Fahrenheit Barrier in a Deep Tuscaloosa Coiled Tubing Clean-out / D. Messler, D. Kippie, M. Broach, D. Benson // SPE 86503. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Con-

trol, 18–20 Feb., Lafayette, Louisiana. – 2004. – DOI: 10.2118/86503-MS

8. Zholob N.R., Luban Y.V., Luban S.V. Research of Thermal Stability of Biopolymer Systems Weighted by Formic Acid Salt // X Międzynarodowa Konferencja [Geopetrol 2016]: pracenaukowe Instytutu Nafty i Gazu Państwowego Instytutu Badawczego 209, Zakopane-Kościelisko, 19–22 wrześ. 2016 r. – Kraków: Instytut Nafty i Gazu Państwowy Instytut Badawczy, 2016. – P. 283–286.

9. Морфология крахмала и крахмалопродуктов: атлас / В.В. Литвяк, Н.К. Юркович, С.М. Бутрим, В.В. Москва. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 217 с.

10. Исследование реологических свойств биополимерной системы Биокар / М.А. Мыслук, В.В. Богославец, Ю.В. Лубан [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. – № 8. – С. 31–36.

11. Исследование структурно-механических свойств биополимерной системы Биокар / М.А. Мыслук, В.В. Богославец, Ю.В. Лубан [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2016. – № 1. – С. 34–38.

12. Исследование фильтрационных свойств биополимерной системы Биокар / М.А. Мыслук, В.В. Богославец, Ю.В. Лубан [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2016. – № 7. – С. 32–36.

13. Мыслук М.А. О методике определения реологических свойств дисперсных сред по данным ротационной вискозиметрии // Инженерно-физический журн. – 1988. – Т. 54, № 6. – С. 975–979.

14. Мыслук М.А., Салыжсин Ю.М. Оценка влияния баротермических условий на реологические свойства буровых растворов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2007. – № 4. – С. 44–47.

15. Мыслук М.А., Салыжсин Ю.М. Оценка реологических свойств бивязких жидкостей по данным ротационной вискозиметрии // Нефт. хоз-во. – 2008. – № 12. – С. 40–42.

16. Myslyuk M., Salyzhyn I. The evaluation of rheological parameters of non-Newtonian fluids by rotational viscosimetry // Applied Rheology. – 2012. – Vol. 22, Issue 3. – P. 323811–323817.

LITERATURA

1. Primenenie biopolimernykh rastvorov dlya provodki gorizonta'nykh skvazhin / M. Sin'yult, L. Grib, Dzh.E. Trouik, M. Dadli // Neft', gaz i neftekhimiya za rubezhom. – 1990. – № 1. – С. 16–20.

2. Krylov V.I., Kretsul V.V. Osobennosti tekhnologii promyvki gorizonta'nykh skvazhin // Neft. hoz-vo. – 2001. – № 6. – С. 36–40.

3. Luban Yu.V. Zastosuvannya bezglinistih promival'nih ridin v umovah visokih plastov ih tiskiv i temperatur / Yu.V. Luban, S.V. Luban, V.V. Dudzich [ta in.] // Naftogazova galuz' Ukraini. – 2013. – № 2. – С. 18–22.

4. O primeneni biopolimernoy sistemy "Biokar" dlya vskrytiya

nizkopronitsaemykh produktivnykh plastov / M.A. Myslyuk, Yu.M. Salyzhyn, V.V. Bogoslavets, Yu.V. Luban // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. – № 3. – С. 35–39.

5. Valizadeh M., Nasiri A.R. Improving Thermal Stability of Starch in Formate Fluids for Drilling High Temperature Shales // Journal of petroleum science and technology. – 2012. – Vol. 2, Issue 1. – P. 61–64. – DOI: 10.22078/JPT.2012.98

6. Downs J.D. High Temperature Stabilisation of Xanthan in Drilling Fluids by the Use of Formate Salts // Physical Chemistry of Colloids and Interfaces in Oil Production: Proceedings of the 6th IFP Exploration and Production Research Conference, Saint-Raphaël, September 4–6. – Paris: Editions Technip, 1992. – P. 197–202.

7. Potassium Formate Milling Fluid Breaks the 400° Fahrenheit Barrier in a Deep Tuscaloosa Coiled Tubing Clean-out / D. Messler, D. Kippie, M. Broach, D. Benson // SPE 86503. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 18–20 Feb., Lafayette, Louisiana. – 2004. – DOI: 10.2118/86503-MS

8. Zholob N.R., Luban Y.V., Luban S.V. Research of Thermal Stability of Biopolymer Systems Weighted by Formic Acid Salt // X Międzynarodowa Konferencja [Geopetrol 2016]: pracenaukowe Instytutu Nafty i Gazu Państwowego Instytutu Badawczego 209, Zakopane-Kościelisko, 19–22 wrześ. 2016 r. – Kraków: Instytut Nafty i Gazu Państwowy Instytut Badawczy, 2016. – P. 283–286.

9. Morfologiya krahmala i krahmaloproduktov: atlas / V.V. Litvyak, N.K. Yurkshovich, S.M. Butrim, V.V. Moskva. – Минск: Belaruskaya navuka, 2013. – 217 s.

10. Issledovanie reologicheskikh svoystv biopolimernoy sistemy Biokar / M.A. Myslyuk, V.V. Bogoslavets, Yu.V. Luban [i dr.] // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. – № 8. – С. 31–36.

11. Issledovanie strukturno-mekhanicheskikh svoystv biopolimernoy sistemy Biokar / M.A. Myslyuk, V.V. Bogoslavets, Yu.V. Luban [i dr.] // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2016. – № 1. – С. 34–38.

12. Issledovanie fil'tratsionnykh svoystv biopolimernoy sistemy Biokar / M.A. Myslyuk, V.V. Bogoslavets, Yu.V. Luban [i dr.] // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2016. – № 7. – С. 32–36.

13. Myslyuk M.A. O metodike opredeleniya reologicheskikh svoystv dispersnykh sred po dannym rotatsionnoy viskozimetrii // Inzhenerno-fizicheskiy zhurn. – 1988. – Т. 54, № 6. – С. 975–979.

14. Myslyuk M.A., Salyzhyn Yu.M. Otsenka vliyaniya barotermicheskikh usloviy na reologicheskie svoystva burovnykh rastvorov // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2007. – № 4. – С. 44–47.

15. Myslyuk M.A., Salyzhyn Yu.M. Otsenka reologicheskikh svoystv bivyazkikh zhidkostey po dannym rotatsionnoy viskozimetrii // Neft. hoz-vo. – 2008. – № 12. – С. 40–42.

16. Myslyuk M., Salyzhyn I. The evaluation of rheological parameters of non-Newtonian fluids by rotational viscosimetry // Applied Rheology. – 2012. – Vol. 22, Issue 3. – P. 323811–323817.

Михаил Андреевич Мыслук¹, д-р техн. наук, профессор
e-mail: mmyslyuk@ukr.net,
Назар Романович Жолоб², аспирант, руководитель сектора
e-mail: n.zholob@gse.ua

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
76019, Украина, г. Ивано-Франковск, ул. Карпатская, 15;

²ООО "Геосинтез Инжиниринг"
36009, Украина, г. Полтава, ул. Дружбы, 10.

Mikhail Andreevich Myslyuk¹, Dr. of tech. sci., Professor
e-mail: mmyslyuk@ukr.net,
Nazar Romanovich Zholob², post-graduate student
e-mail: n.zholob@gse.ua

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15, Karpatskaya str., Ivano-Frankovsk, 76019, Ukraine;

²LLC "Geosynthesis Engineering"
10, Druzhba str., Poltava, 36009, Ukraine.