

УДК 622.248:004.8

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОСТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

И. А. АЛЕНЬКИН

*Государственное автономное и образовательное учреждение высшего  
образования «Альметьевский государственный технологический университет  
«Высшая школа нефти», Российская Федерация*

**Аннотация.** Рассмотрена задача прогнозирования технологических параметров жидкостей гидроразрыва пласта на основе методов машинного обучения. Представлен подход к формированию датасета, включающего реологические характеристики гелей, параметры разрушения и восстановления структуры, а также физико-химические свойства воды и дозировки химических реагентов. Проведен анализ взаимосвязей между входными и целевыми параметрами с использованием корреляционного и регрессионного анализа. Для построения прогнозных моделей применены аддитивная нелинейная регрессия, а также регуляризационные методы Lasso и Ridge. Дополнительно использованы ансамблевые алгоритмы машинного обучения, включая случайный лес и градиентный бустинг. Разработанная модель продемонстрировала высокую точность прогнозирования ключевых параметров, таких как средняя вязкость при закачке, вязкость через 60 и 250 мин, а также время разрушения сшитой системы. Показана возможность практического применения модели для оперативного подбора рецептур жидкостей гидроразрыва пласта и сокращения объемов лабораторных испытаний.

**Ключевые слова:** гидроразрыв пласта, жидкости гидроразрыва пласта, машинное обучение, искусственный интеллект, прогнозирование, реологические свойства, вязкость, подбор рецептур, цифровые технологии, нефтегазовая промышленность.

**Для цитирования.** Аленькин, И. А. Прогнозирование технологических параметров жидкостей гидравлического разрыва пласта с применением методов искусственного интеллекта / И. А. Аленькин // Нефтегазовый инжиниринг. – 2026. – № 1 (4). – С. 42–51.

## PREDICTION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF HYDRAULIC FRACTURING FLUIDS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

I. A. ALENKIN

*Almetyevsk State Technological University “Higher School of Oil”, Russian Federation*

**Annotation.** The paper addresses the problem of predicting technological parameters of hydraulic fracturing fluids using machine learning methods. An approach to dataset formation is presented, including rheological characteristics of gels, parameters of structure breaking and recovery, as well as physicochemical properties of water and dosages of chemical reagents. Relationships between input and target parameters are analyzed using correlation and regression analysis. Additive nonlinear regression and regularization methods such as Lasso and Ridge regression are applied to build predictive models. In addition, ensemble machine learning algorithms, including random forest and gradient boosting, are used. The developed model demonstrates high accuracy in predicting key parameters such as average viscosity during pumping, viscosity after 60 and 250 min, and breaking time of the crosslinked system. The results confirm the possibility of practical application of the model for rapid selection of hydraulic fracturing fluid formulations and reduction of laboratory testing.

**Keywords:** hydraulic fracturing, fracturing fluids, machine learning, artificial intelligence, prediction, rheological properties, viscosity, formulation design, digital technologies, oil and gas industry.

**For citation.** Alenkin I. A. Prediction of technological parameters of hydraulic fracturing fluids using artificial intelligence methods. *Oil and gas engineering*, 2026, no. 1 (4), pp. 42–51 (in Russian).

**Введение.** Современные технологии разработки месторождений требуют гибкой адаптации технологических решений к изменяющимся условиям эксплуатации, особенно в части подбора рецептур жидкостей для гидроразрыва пласта (ГРП) [1–4]. Одной из ключевых проблем остается высокая чувствительность реологических и пескоудерживающих свойств жидкостей ГРП к физико-химическим характеристикам воды, в частности – к содержанию ионов кальция, хлоридов, гидрокарбонатов и других компонентов, а также к температурным условиям. Стандартные методы подбора рецептур являются трудоемкими, затратными по времени и не всегда обеспечивают достаточную адаптивность к сезонным вариациям [5].

С учетом результатов экспериментальных исследований, выявивших влияние различных ионных составов и температурных факторов на параметры жидкости ГРП [6], становится актуальной задача разработки модели подбора и прогнозирования параметров жидкостей с использованием алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения. Такая модель должна учитывать многофакторные зависимости между составом воды, типами химических реагентов, их концентрациями и итоговыми технологическими свойствами растворов (вязкость, пескоудерживающая способность и др.).

**Цель работы.** Создание и обучение модели искусственного интеллекта (ИИ), способной прогнозировать технологические характеристики жидкостей ГРП в зависимости от входных параметров (ионный состав воды, тип реагентов), а также рекомендовать оптимальные рецептуры для конкретных условий эксплуатации. Модель должна базироваться на экспериментальных данных и демонстрировать высокую точность предсказания, что позволит применять ее в рамках цифровых решений для оперативного проектирования жидкостей.

**Описание работы.** Датасет для обучения модели содержит 21 параметр (табл. 1).

Таблица 1. Параметры датасета для обучения модели

Table 1. Dataset parameters for model training

| Параметр                                                         | Пример № 1 | Пример № 2 |
|------------------------------------------------------------------|------------|------------|
| Загрузка деструктора, л/м <sup>3</sup>                           | 1,0        | 1,0        |
| Загрузка сшивателя, л/м <sup>3</sup>                             | 1,5        | 2,0        |
| Время закрытия воронки, с                                        | 25,96      | 13,42      |
| Время поднятия купола, с                                         | 31,78      | 17,56      |
| Вязкость линейного геля, при 100 с <sup>-1</sup>                 | 53,1       | 53,1       |
| Вязкость линейного геля, при 511 с <sup>-1</sup>                 | 23,8       | 23,8       |
| Время восстановления, с                                          | 0,5        | 1,4        |
| Средняя вязкость на сдвиге, мПа · с                              | 595,8      | 441,13     |
| Вязкость на 60 мин, мПа · с                                      | 720,8      | 806,5      |
| Время разрушения сшитой системы до 400 мПа · с                   | 0          | 736        |
| Вязкость на 250 мин                                              | 599,5      | 570,9      |
| Время закрытия воронки (вода), с                                 | 11,22      | 11,22      |
| Время поднятия купола (вода), с                                  | 15,12      | 15,12      |
| Вязкость линейного геля, при 100 с <sup>-1</sup> (вода), мПа · с | 51,8       | 51,8       |
| Вязкость линейного геля, при 511 с <sup>-1</sup> (вода), мПа · с | 19,7       | 19,7       |

Окончание табл. 1

Final table 1

| Параметр        | Пример № 1 | Пример № 2 |
|-----------------|------------|------------|
| pH              | 7,9        | 7,9        |
| Хлориды         | 71,0       | 71         |
| Щелочность      | 122,0      | 122        |
| Сульфаты        | 76,8       | 76,8       |
| Общая жесткость | 180,2      | 180,2      |
| Общее железо    | 0,2        | 0,2        |

В качестве целевых параметров были взяты следующие характеристики:

- 1) «средняя вязкость при закачке»;
- 2) «вязкость по истечении двойного времени закачки (60 мин)»;
- 3) «вязкость по истечении 4 ч»;
- 4) «время разрушения»;
- 5) «время восстановления после снятия сдвиговой нагрузки».

Для более глубокого анализа взаимосвязей целевых и нецелевых параметров рассмотрим их влияние через несколько подходов: корреляционный анализ, а также построение регрессионных моделей для выявления закономерностей. На основе этих методов можно выделить следующие взаимосвязи:

- Параметр времени восстановления после снятия сдвиговой нагрузки отражает способность геля возвращаться к стабильному состоянию после механического воздействия. Установлена слабая отрицательная корреляция с вязкостью линейного геля при  $100 \text{ c}^{-1}$ , что может свидетельствовать о том, что более вязкие системы восстанавливаются быстрее за счет устойчивой структуры.

- Средняя вязкость при закачке характеризует структурную устойчивость геля. Она умеренно коррелирует с вязкостью линейного геля при различных скоростях сдвига ( $100$  и  $511 \text{ c}^{-1}$ ), подтверждая значимость исходных реологических свойств. Параметр демонстрирует зависимость от времени закрытия «воронки», что указывает на влияние внутренней динамики смеси. Регрессионный анализ показал, что сочетание начальной вязкости и времени закрытия объясняет до 60 % изменчивости данной характеристики.

- Вязкость по истечении двойного времени закачки отражает стабильность геля во времени и демонстрирует сильную корреляцию с вязкостью по истечении 4 ч, подтверждая устойчивость системы при длительном воздействии. Также выявлена связь с временем формирования «купола», что может быть обусловлено влиянием гидродинамических факторов на структурную консистенцию.

- Время разрушения сшитой системы характеризует прочность структуры сшитого геля. Параметр положительно коррелирует с вязкостью линейного геля при  $511 \text{ c}^{-1}$  и вязкостью по истечении 4 ч, что говорит о влиянии исходной и долгосрочной вязкости на устойчивость сшитой структуры.

Таким образом, установленные зависимости подтверждают ключевую роль реологических и физико-химических характеристик в формировании целевых свойств систем. Полученные данные могут быть использованы для построения прогнозных моделей и выбора оптимальных параметров рецептур под конкретные технологические условия.

Для решения задач, связанных с ограниченным набором данных, была разработана комплексная методика построения математической модели, основанная на использовании современных подходов анализа данных. В рамках данной методики применяются аддитивная нелинейная регрессия, а также регуляризационные методы Lasso- и Ridge-регрессии. Эти методы зарекомендовали себя как эффективные инструменты

при работе с небольшими объемами данных и высокой размерностью задачи, включая случаи с большим количеством управляющих параметров и их потенциальной взаимозависимостью.

Разработанный подход не только позволяет корректно выявлять ключевые закономерности в данных, но и способствует минимизации переобучения модели, что особенно важно в условиях ограниченной выборки. За счет использования Lasso-регрессии удастся эффективно проводить отбор наиболее значимых переменных, тогда как Ridge-регрессия помогает учитывать коррелированные параметры, сохраняя стабильность модели.

На текущий момент алгоритм был успешно протестирован на экспериментальных данных и показал свою состоятельность для построения прогностических моделей.

Для повышения точности и оперативности подбора рецептов жидкостей для гидроразрыва пласта была реализована система предиктивного моделирования на основе методов машинного обучения. Основная цель заключалась в создании алгоритмов, способных прогнозировать ключевые технологические параметры жидкостей (такие как вязкость, устойчивость к разрушению, восстановление после сдвига и др.) на основе исходных характеристик воды, свойств компонентов и условий приготовления.

На этапе построения моделей особое внимание было уделено выбору признаков, коррелирующих с целевыми параметрами, а также обеспечению репрезентативности обучающей выборки. Были использованы как индивидуальные, так и ансамблевые методы обучения, включая градиентный бустинг, случайный лес и нейросетевые подходы, с последующей валидацией по метрикам качества ( $MAPE$ ,  $RMSE$ ,  $R^2$ ). Выбор моделей определялся по результатам кросс-проверки и анализа важности признаков, что обеспечило интерпретируемость и адаптивность полученных решений под разные технологические сценарии.

Для оценки эффективности разработанной модели ИИ были выполнены тестовые испытания на трех различных комбинациях партий сшивателя и деструктора.

Анализ первой пары сшивателя-деструктора показал высокие показатели точности для большинства исследуемых характеристик: коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) для средней вязкости (0,79), вязкости на 60-й мин (0,80), вязкости на 250-й мин (0,75) и времени разрушения (0,75) говорят о сильной корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями (рис. 1–4, табл. 2).

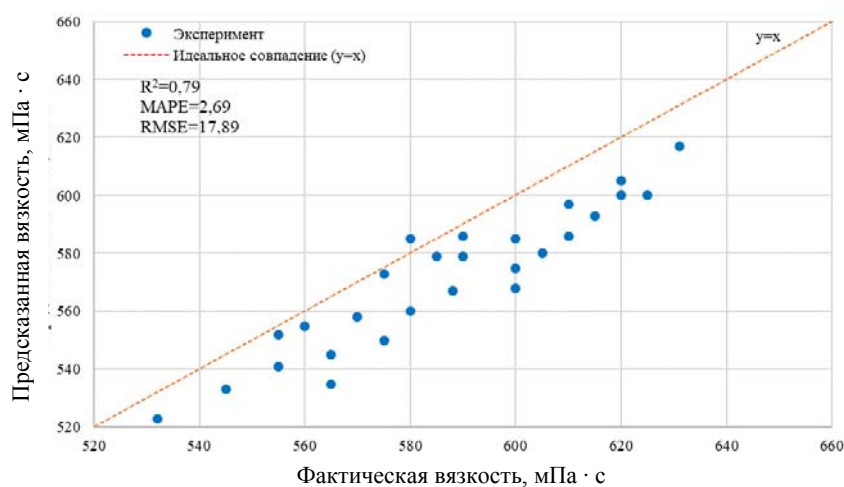


Рис. 1. Фактические и предсказанные значения динамической вязкости для параметра «средняя вязкость на сдвигах», пара 1

Fig. 1. Actual and predicted values of dynamic viscosity for the parameter “average shear viscosity”, pair 1

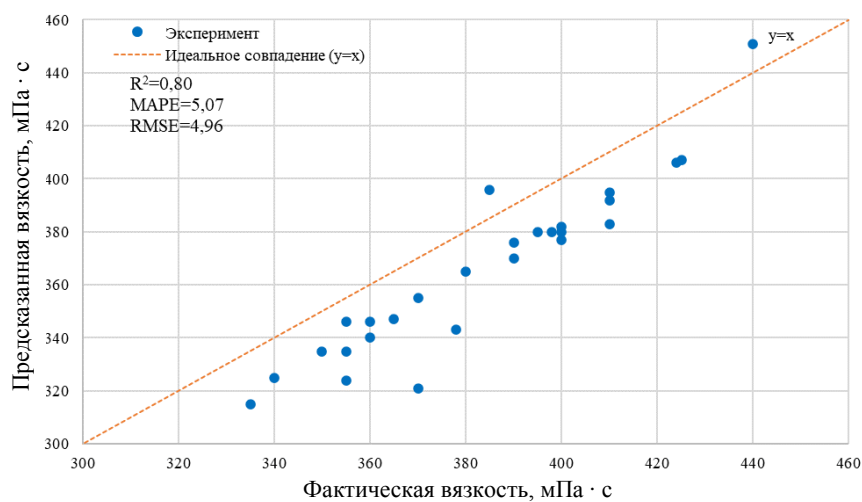


Рис. 2. Фактические и предсказанные значения динамической вязкости для параметра «вязкость через 60 мин», пара 1

Fig. 2. Actual and predicted values of dynamic viscosity for the parameter "viscosity after 60 minutes", pair 1

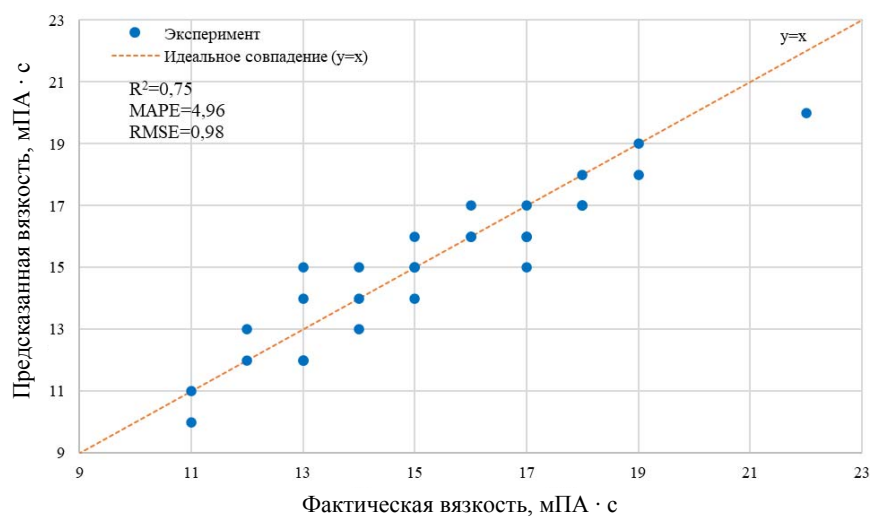


Рис. 3. Фактические и предсказанные значения динамической вязкости для параметра «вязкость через 250 мин», пара 1

Fig. 3. Actual and predicted values of dynamic viscosity for the parameter "viscosity after 250 minutes", pair 1

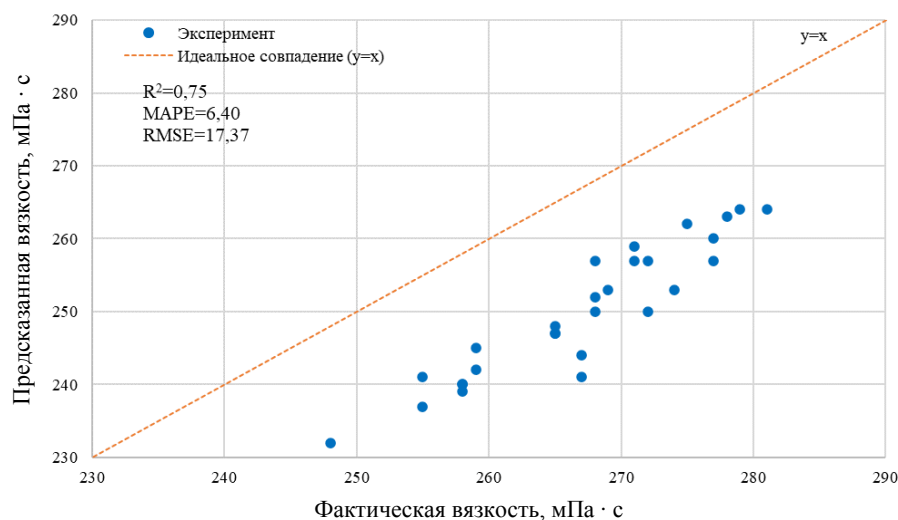


Рис. 4. Фактические и предсказанные значения времени для параметра «время разрушения», пара 1

Fig. 4. Actual and predicted time values for the “destruction time” parameter, pair 1

Таблица 2. Фактические и предсказанные значения для определяемых параметров (пара 1)

Table 2. Actual and predicted values for the determined parameters (pair 1)

| Но-<br>мер | Средняя<br>вязкость<br>на «сдвигах»,<br>мПа · с |                         | Динамическая<br>вязкость<br>через 60 мин,<br>мПа · с |                         | Динамическая<br>вязкость<br>через 250 мин,<br>мПа · с |                         | Время<br>деструкции<br>до динамической<br>вязкости<br>5–10 мПа · с,<br>мин |                         | Время<br>восстановления<br>динамической<br>вязкости<br>после снятия<br>сдвиговой<br>нагрузки, мин |                         |
|------------|-------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|            | Факти-<br>ческие                                | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                     | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                      | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                                           | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                                                                  | Пред-<br>сказан-<br>ные |
| 1          | 631                                             | 617                     | 424                                                  | 406                     | 17                                                    | 17                      | 275                                                                        | 262                     | 3                                                                                                 | 4                       |
| 2          | 588                                             | 567                     | 365                                                  | 347                     | 13                                                    | 14                      | 268                                                                        | 252                     | 5                                                                                                 | 4                       |
| 3          | 610                                             | 586                     | 398                                                  | 380                     | 22                                                    | 20                      | 278                                                                        | 263                     | 4                                                                                                 | 4                       |
| 4          | 532                                             | 523                     | 355                                                  | 324                     | 11                                                    | 11                      | 267                                                                        | 244                     | 6                                                                                                 | 6                       |
| 5          | 580                                             | 585                     | 440                                                  | 451                     | 19                                                    | 18                      | 271                                                                        | 259                     | 4                                                                                                 | 3                       |
| 6          | 620                                             | 605                     | 400                                                  | 380                     | 15                                                    | 16                      | 269                                                                        | 253                     | 7                                                                                                 | 5                       |
| 7          | 575                                             | 573                     | 335                                                  | 315                     | 12                                                    | 13                      | 258                                                                        | 240                     | 4                                                                                                 | 4                       |
| 8          | 600                                             | 568                     | 378                                                  | 343                     | 19                                                    | 19                      | 277                                                                        | 260                     | 2                                                                                                 | 3                       |
| 9          | 560                                             | 555                     | 310                                                  | 295                     | 13                                                    | 12                      | 248                                                                        | 232                     | 6                                                                                                 | 6                       |
| 10         | 590                                             | 586                     | 425                                                  | 407                     | 14                                                    | 15                      | 259                                                                        | 242                     | 5                                                                                                 | 7                       |
| 11         | 615                                             | 593                     | 385                                                  | 396                     | 16                                                    | 17                      | 268                                                                        | 257                     | 4                                                                                                 | 4                       |
| 12         | 555                                             | 541                     | 355                                                  | 335                     | 13                                                    | 15                      | 255                                                                        | 241                     | 3                                                                                                 | 2                       |
| 13         | 530                                             | 515                     | 360                                                  | 346                     | 15                                                    | 15                      | 255                                                                        | 237                     | 4                                                                                                 | 4                       |

Окончание табл. 2

Final table 2

| Но-<br>мер | Средняя<br>вязкость<br>на «сдвигах»,<br>мПа · с |                         | Динамическая<br>вязкость<br>через 60 мин,<br>мПа · с |                         | Динамическая<br>вязкость<br>через 250 мин,<br>мПа · с |                         | Время<br>деструкции<br>до динамической<br>вязкости<br>5–10 мПа · с,<br>мин |                         | Время<br>восстановления<br>динамической<br>вязкости<br>после снятия<br>сдвиговой<br>нагрузки, мин |                         |
|------------|-------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|            | Факти-<br>ческие                                | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                     | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                      | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                                           | Пред-<br>сказан-<br>ные | Факти-<br>ческие                                                                                  | Пред-<br>сказан-<br>ные |
| 14         | 625                                             | 600                     | 410                                                  | 395                     | 18                                                    | 18                      | 267                                                                        | 241                     | 6                                                                                                 | 5                       |
| 15         | 570                                             | 558                     | 370                                                  | 321                     | 14                                                    | 14                      | 265                                                                        | 247                     | 5                                                                                                 | 6                       |
| 16         | 585                                             | 579                     | 400                                                  | 382                     | 17                                                    | 16                      | 272                                                                        | 257                     | 3                                                                                                 | 3                       |
| 17         | 600                                             | 585                     | 390                                                  | 370                     | 16                                                    | 16                      | 272                                                                        | 250                     | 5                                                                                                 | 5                       |
| 18         | 545                                             | 533                     | 350                                                  | 335                     | 12                                                    | 12                      | 259                                                                        | 245                     | 4                                                                                                 | 4                       |
| 19         | 565                                             | 545                     | 360                                                  | 340                     | 13                                                    | 12                      | 258                                                                        | 239                     | 6                                                                                                 | 4                       |
| 20         | 610                                             | 597                     | 410                                                  | 392                     | 18                                                    | 17                      | 268                                                                        | 250                     | 7                                                                                                 | 6                       |
| 21         | 575                                             | 550                     | 380                                                  | 365                     | 15                                                    | 15                      | 271                                                                        | 257                     | 3                                                                                                 | 2                       |
| 22         | 590                                             | 579                     | 395                                                  | 380                     | 16                                                    | 16                      | 279                                                                        | 264                     | 4                                                                                                 | 5                       |
| 23         | 555                                             | 552                     | 340                                                  | 325                     | 11                                                    | 10                      | 258                                                                        | 240                     | 5                                                                                                 | 4                       |
| 24         | 605                                             | 580                     | 400                                                  | 377                     | 17                                                    | 15                      | 265                                                                        | 248                     | 6                                                                                                 | 5                       |
| 25         | 580                                             | 560                     | 370                                                  | 355                     | 15                                                    | 14                      | 265                                                                        | 247                     | 4                                                                                                 | 5                       |
| 26         | 620                                             | 600                     | 410                                                  | 383                     | 18                                                    | 17                      | 281                                                                        | 264                     | 5                                                                                                 | 6                       |
| 27         | 565                                             | 535                     | 355                                                  | 346                     | 14                                                    | 13                      | 274                                                                        | 253                     | 6                                                                                                 | 7                       |
| 28         | 600                                             | 575                     | 390                                                  | 376                     | 17                                                    | 16                      | 277                                                                        | 257                     | 4                                                                                                 | 3                       |

Необходимо отметить, что все значения параметра «время разрушения» на рис. 4 имеют отклонение вниз, т. е. предсказанные значения системно ниже фактических, хотя и незначительно. При этом корреляция остается достаточно высокой ( $R^2 = 0,75$ ). Видимо, это связано с изменением качества или соотношением компонентов в конкретной испытуемой партии деструктора.

Для времени восстановления наблюдается низкая корреляция ( $R^2 = 0,25$ ). По-видимому, это связано с тем, что значения этого параметра находятся в пределах небольших диапазонов (2–7 с), что делает его чувствительным даже к незначительным отклонениям. Из-за этого исследуемая модель не всегда может точно предсказать восстановление геля в таких коротких временных промежутках. Для более точной оценки времени восстановления может потребоваться иной подход, учитывающий более высокую чувствительность и точность измерений, возможно, с применением предсказания интервалов.

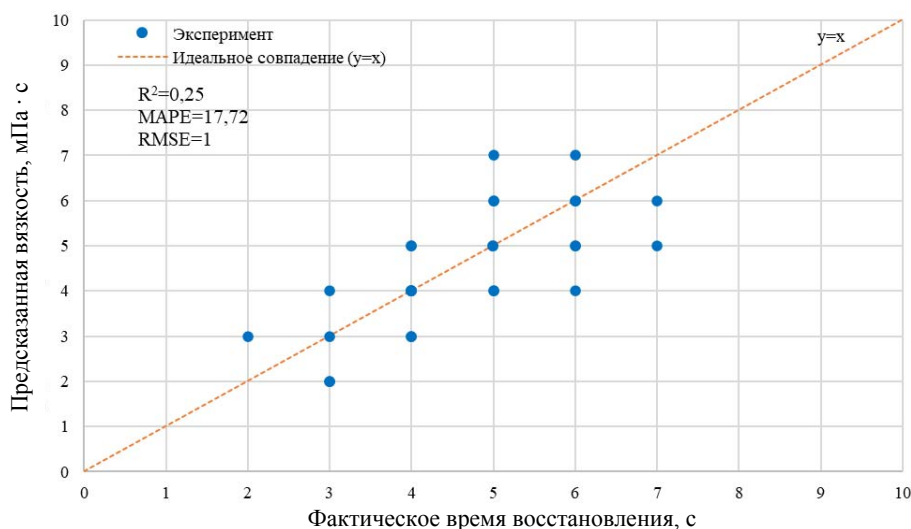


Рис. 5. Фактические и предсказанные значения динамической вязкости для параметра «время восстановления», пара 1

Fig. 5. Actual and predicted values of dynamic viscosity for the “recovery time” parameter, pair 1

Значения *MAPE* для средней вязкости (2,69 %), вязкости на 60-й мин (5,07 %), вязкости на 250-й мин (4,96 %) и времени разрушения (6,40 %) подтверждают хорошую точность прогнозирования. Высокий показатель *MAPE* для времени восстановления (17,72 %) свидетельствует о сложности моделирования данного параметра, как и в случае с  $R^2$ . *RMSE* для всех параметров также находится в допустимом диапазоне для инженерных расчетов.

Во второй паре наблюдалось умеренное снижение точности по сравнению с первой. Коэффициенты детерминации для средней вязкости и вязкости на 60-й мин ( $R^2 = 0,74$  и  $R^2 = 0,72$  соответственно) остаются достаточно высокими. Время разрушения сохраняет хорошую корреляцию ( $R^2 = 0,67$ ), а время восстановления демонстрирует умеренные показатели ( $R^2 = 0,51$ ). Анализ *MAPE* для этой пары выявил высокую точность прогнозов по средней вязкости (2,42 %) и вязкости на 60-й мин (1,28 %), умеренную точность для времени разрушения (2,94 %) и вязкости на 250-й мин (9,21 %) и недостаточную, опять же, для времени восстановления (32,14 %). Значения *RMSE* подтверждают выявленные тенденции.

Третья пара (рис. 2, табл. 2) показала умеренную точность моделирования. Коэффициенты детерминации для средней вязкости ( $R^2 = 0,64$ ), вязкости на 60-й мин ( $R^2 = 0,58$ ) и времени разрушения ( $R^2 = 0,65$ ) указывают на хорошую степень корреляции. При этом вязкость на 250-й мин практически не моделируется данной парой. Время восстановления также демонстрирует относительно низкие показатели точности ( $R^2 = 0,41$ ).

Значения *MAPE* подтверждают эту тенденцию, показывая высокие уровни для средней вязкости (2,20 %) и времени разрушения (2,66 %), умеренные значения для вязкости на 250-й мин (15,28 %) и времени восстановления (15,18 %). *RMSE* демонстрируют умеренные показатели.

**Заключение.** В результате проведенных исследований можно отметить следующее:

1. Разработана программа для ЭВМ (свидетельство о регистрации № 2024682951), реализующая алгоритмы машинного обучения, способные предсказывать параметры геля на основе характеристик воды и реагентов. Модель обучалась на расширенной

выборке, включающей 28 наборов данных с разнообразными комбинациями реагентов и условий. Точность модели подтверждена метриками: коэффициенты детерминации  $R^2$  достигли 0,7–0,8 для ключевых параметров, а значения  $MAPE$  составили 1,28–6,4 % для большинства характеристик.  $RMSE$  не превышал критических порогов, допустимых для инженерных расчетов.

Для параметра «время восстановления» наблюдается низкий  $R^2$  (0,25–0,51), что объясняется узким диапазоном значений (2–7 с) и высокой чувствительностью к единичным отклонениям. Однако модель позволяет прогнозировать допустимые интервалы этого параметра.

Верификация на трех независимых комбинациях партий сшивателя и деструктора показала устойчивую работу модели. В 92–95 % случаев модель правильно предсказала рецептуры, обеспечивающие требуемые значения вязкости и времени разрушения.

Разработанная интеллектуальная модель подбора рецептур жидкостей для гидроразрыва пласта позволяет существенно сократить затраты времени и ресурсов, традиционно расходуемые на лабораторные исследования. В условиях производственной практики время подбора одной рецептуры с учетом всех этапов (подготовка растворов, реометрические испытания, корректировки, повторные замеры) может составлять от 12 до 24 ч работы двух специалистов. Внедрение модели, автоматически формирующей рецептуру с заданными параметрами, позволяет сократить это время в десятки раз, что обеспечивает значительную экономию трудозатрат и времени работы оборудования.

Кроме того, снижение количества необходимых лабораторных испытаний позволяет уменьшить эксплуатационные затраты на расходные материалы (реагенты, фильтры, реактивы), а также на амортизацию оборудования, включая дорогостоящие реометры. Таким образом, даже при частичном внедрении модели возможна экономия в десятки тысяч рублей на каждой серии испытаний, что особенно актуально при работе с десятками скважин в рамках одного проекта.

Отдельно стоит отметить высокий потенциал масштабирования предложенной модели: ее алгоритмическая основа может быть адаптирована под жидкости на основе не только боратных сшивателей, но и других типов сшивателей (циркониевых, титановых, хромовых), а также новых систем на основе биополимеров и синтетических реагентов. Это делает разработку универсальной платформой для построения цифровых решений в области оптимизации технологических жидкостей в нефтегазовой отрасли.

### Литература

1. Хузина, Л. Б. Анализ патентной и научной литературы в области гидроразрыва пласта / Л. Б. Хузина, С. В. Любимова, И. Г. Фаттахов // Вестник Российской Академии естественных наук. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 35–38.
2. Зацарина, Л. В. Оценка эффективности геолого-технических мероприятий на бобриковском объекте Тат-Кандызского месторождения / Л. В. Зацарина, Р. Р. Бадуртдинов, И. Н. Хакимзянов // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть / Публ. акционер. о-во «ТАТНЕФТЬ» им. В. Д. Шашина. – М., 2019. – Вып. LXXXVII. – С. 82–87.
3. Анализ эффективности применения методов увеличения нефтеотдачи пластов и интенсификации добычи нефти в условиях Западно-Сибирской провинции / Р. А. Исмаков, А. А. М. Абдулла, А. П. Чижов, А. В. Лягов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – № 4 (138). – С. 24–42.
4. Гарипова, Л. И. Об эффективности проведения ГРП на месторождениях ОАО «Татнефть» / Л. И. Гарипова, В. А. Иктисанов // Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института. – 2014. – № 1. – С. 73–78.

5. Аленькин, И. А. Применение машинного обучения при подборе жидкости гидроразрыва / И. А. Аленькин // МИТРО 2024 «Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника»: III Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, г. Гомель, 6 дек. 2024 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2024. – С. 16–17.
6. Исследование влияния физико-химического состава пресной воды на реологические свойства жидкостей гидроразрыва пласта / А. В. Насыбуллин, И. А. Аленькин, Р. Л. Будкевич [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2025. – № 7 (403). – С. 53–62.

### References

1. Khuzina L. B., Lyubimova S. V., Fattakhov I. G. Analysis of patent and scientific literature in the field of hydraulic fracturing. *Vestnik Rossiiskoi Akademii estestvennykh nauk*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 35–38 (in Russian).
2. Zatsarina L. V., Badurtdinov R. R., Khakimzyanov I. N. Evaluation of the effectiveness of geological and technical measures at the Bobrikov site of the Tat-Kandyz field. *Sbornik nauchnykh trudov TatNIPIneft'* [Collection of scientific works TatNIPIneft]. Moscow, Publichnoe aktsionernoe obshchestvo «Tatneft'» im. V. D. Shashina, 2019, pp. 82–87 (in Russian).
3. Ismakov R. A., Abdulla A. A. M., Chizhov A. P., Lyagov A. V. Analysis of the efficiency of the application of methods for enhanced oil recovery and intensification of oil production in the conditions of the West Siberian province. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov*, 2022, no. 4 (138), pp. 24–42 (in Russian).
4. Garipova L. I., Iktisanov V. A. On the efficiency of hydraulic fracturing at the fields of OAO Tatneft. *Materialy nauchnoi sessii uchenykh Al'met'evskogo gosudarstvennogo neftyanogo instituta*, 2014, no. 1, pp. 73–78 (in Russian).
5. Alen'kin I. A. Machine learning in fracturing fluid selection. *MITRo 2024 «Mashinostroenie. Innovatsii. Tekhnologii. Robototekhnika»*: III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. aspirantov, magistrantov i studentov, Gomel', 6 dek. 2024 g. [MITRO 2024 “Mechanical Engineering. Innovations. Technologies. Robotics”: III International Scientific and Practical Conference of Postgraduate, Master's, and Undergraduate Students, Gomel, December 6, 2024]. Gomel', M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Gomel. gos. tekhn. un-t im. P. O. Sukhogo, 2024, pp. 16–17 (in Russian).
6. Nasybullin A. V., Alenkin I. A., Budkevich R. L., Kochetkov A. V., Zakirov R. R. Study of the influence of physicochemical composition of fresh water on rheological properties of hydraulic fracturing fluids. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2025, no. 7 (403), pp. 53–62.

### Информация об авторах

Аленькин Илья Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории «Нефтепромысловая химия». Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти» (ул. Советская, 216, 423462, Альметьевск, Российская Федерация). E-mail: i.alenkin@agni-rt.ru

### Information about the authors

Ilya Alekseevich Alenkin – junior researcher Laboratory of Oilfield Chemistry. Almeteyvsk State Technological University “Higher School of Oil” (216, Sovetskaya Str., 423462, Almeteyvsk, Russian Federation). E-mail: i.alenkin@agni-rt.ru

Поступила в редакцию 18.02.2026