

УДК 556.314:662.276(476)

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ МАСШТАБОВ
РАССОЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТЯНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЕЛАРУСИ ПО ПРОМЫСЛОВЫМ
ГИДРОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

С. Л. ПОРОШИНА

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: нефтяное месторождение, засолоненный коллектор, галит, рассоление, добывающая скважина, попутные воды, гидрохимические методы.

Введение

Нефтяные месторождения Припятской нефтегазоносной области, Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции и ряда других нефтедобывающих регионов мира связаны с засолоненными коллекторами. Поры, трещины и каверны продуктивных горизонтов этих регионов частично, а иногда и полностью заполнены галитом, который незакономерно распространен как в терригенных, так и в карбонатных породах. При разработке открытых здесь залежей с использованием пресных или слабоминерализованных вод для вытеснения нефти происходит растворение данного минерала, что приводит к значительному изменению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород. Для рациональной разработки нефтяных месторождений, природные коллекторы которых осложнены хлоридным солеотложением, необходимо учитывать происходящие изменения пористости и проницаемости продуктивных пластов в процессе эксплуатации скважин, добывающих обводненную продукцию. До недавнего времени изучению рассматриваемого вопроса в нефтяных компаниях, проводящих эксплуатацию нефтяных скважин в районах распространения засолоненных продуктивных пород, должного внимания не уделялось. В последнее десятилетие отмечается активизация исследований по изучению рассоления пород при разработке нефтяных месторождений в Российской Федерации, приступившей к активному освоению углеводородных ресурсов юга Сибирской платформы. При этом преимущество здесь отдается лабораторным методам изучения особенностей изменения емкостных и фильтрационных свойств образцов пород в процессе их отмычки от солей. В целях перенесения полученных на небольших образцах результатов на продуктивные пласты предпринимаются попытки изучения процесса рассоления с помощью существующих теоретических представлений и его моделирования с использованием специальных опций, заложенных в компьютерные программные комплексы, разработанные для моделирования эксплуатации нефтяных месторождений. Однако отсутствие надежных данных о закономерностях распространения и особенностях распределения галитовых новообразований продуктивных горизонтов в межскважинном пространстве затрудняет изучение интенсивности протекания процесса их растворения и оценки масштабов рассоления пород в различных участках нефтяных залежей.

В Республике Беларусь при изучении данного вопроса преимущество отдавалось гидрохимическим методам исследований. Для решения поставленных задач путем обработки гидрохимических данных в мировой практике при эксплуатации залежей углеводородов в засоленных коллекторах обычно используются методики и компьютерные программы по оценке степени насыщенности пластовых, закачиваемых и попутных вод хлоридными минералами и прежде всего галитом.

Однако использование таких программ позволяет оценить лишь максимальную потенциальную способность различных по составу вод растворять или осаждать хлоридные минералы при изменении термобарических условий или при смешении различных по химическому составу вод и рассолов. Поэтому рассматриваемые гидрохимические программы широко применяются на практике для обоснования целесообразности использования конкретных вод в системе поддержания пластового давления при разработке залежей нефти в засоленных коллекторах как для нефтяных месторождений Припятского прогиба [2]–[5], так и для месторождений юга Восточной Сибири [6]–[9].

Первые гидрохимические методы оценки масштабов рассоления коллекторов нефтяных месторождений Беларуси были разработаны в БелНИПИнефть еще в середине девяностых годов прошлого столетия [10], [11]. На их основании были разработаны алгоритмы и составлены программы GALIT, KANAL и EXPRESS, реализованные на языке программирования FoxPro. Результаты расчетов по данным программам нашли широкое отражение в открытой печати [1], [3], [12]. Первые пока еще робкие попытки использования промысловых гидрохимических данных с целью контроля разработки нефтяных и газовых залежей предприняты в последние годы российскими нефтяниками на материалах месторождений Восточной Сибири. Однако отсутствие опыта проведения таких работ и слабое знакомство с их научно-методическими основами пока не позволяют российским специалистам вести эти работы на должном уровне.

Следует констатировать, что почти два десятилетия расчеты объемов растворенного галита при эксплуатации обводнившихся скважин в БелНИПИнефть не проводились. Возобновление этих работ в настоящее время вызывает определенные сложности. Прежде всего, нами отмечено, что эти компьютерные программы составлены на устаревшем языке программирования и иногда дают сбой при их использовании, устранить которые при отсутствии их составителей удастся не всегда [13]. Для подготовки программ (особенно наиболее сложной и более надежно аргументированной программы KANAL) на одном из современных языков программирования требуется специальная постановка работ, а также совместная работа автора алгоритмов программ и программистов. Целью данной работы является разработка новых и корректировка существующих гидрохимических методов применительно к белорусским месторождениям.

Основная часть

Анализ ранее предложенных методов оценки объемов растворенного в продуктивных пластах и вынесенного попутными водами галита свидетельствует, что наиболее сложная их часть связана с корректным определением долевого участия пластовых и закачиваемых вод в попутных рассолах. Для решения данной задачи специалистами БелНИПИнефть было предложено использовать сведения по общей минерализации пластовой, закачиваемой и извлекаемой совместно с нефтью воды [10]–[12], [14] по формуле

$$X = \frac{(M_{\text{пл}} - M_{\text{поп}})}{(M_{\text{пл}} - M_3)}, \quad (1)$$

где X – доля закачиваемой воды в попутно добываемой; $M_{\text{пл}}$ – общая минерализация пластовой воды, г/л; $M_{\text{поп}}$ – общая минерализация извлекаемой совместно с нефтью воды, г/л; M_3 – общая минерализация закачиваемой воды, г/л.

Однако общая минерализация попутно извлекаемых рассолов определяется не только смешением пластовых и закачиваемых вод, но и растворением галита, тогда

$$M_{\text{поп}} = M_{\text{теор}} + M_{\text{изб}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{теор}}$ – минерализация попутных рассолов, сформировавшаяся за счет смешения пластовых и закачиваемых вод, г/л; $M_{\text{изб}}$ – избыточная величина общей минерализации, сформировавшаяся за счет растворения галитовых выделений, г/л.

Исключить влияние избыточной величины минерализации на достоверность определения содержаний в попутных водах дополнительных концентраций хлорида натрия предлагалось методом последовательных итераций, суть которого заключается в том, что на каждом шаге определяются избыточные содержания Na и NaCl. Затем они вычитаются из концентрации натрия в попутных водах и их минерализации соответственно. На последующем шаге в расчете принимаются эти исправленные величины, после чего расчеты повторяются. Общее количество содержащегося в попутной воде дополнительного NaCl определялось путем суммирования избыточных его концентраций на каждом шаге итерации. Для практически полного исключения влияния растворенного галита на точность расчетов доли закачиваемой воды в попутно добываемой обычно осуществлялось 8–10 итераций. Кроме того, при проведении расчетов по программе KANAL метод последовательных приближений применялся и для учета влияния процессов растворения (выпадения) кальцита, гипса и ангидрита на точность определения величины X .

Сложная процедура определения долевого участия закачиваемой и пластовой воды в попутной затрудняет оперативное использование гидрохимической информации для контроля за рассолом коллекторов при разработке нефтяных залежей. Особые сложности возникают при проведении таких расчетов непосредственно на нефтепромыслах. Это указывало на необходимость обоснования упрощенных методов решения данной задачи, которые бы вместе с тем не вносили существенной ошибки в значения определяемого параметра. Предложены новые подходы к решению поставленной задачи и разработаны компьютерные программы GALIT-1 и GALIT-M, реализованные в формате Excel. Основы этих методов и результаты их апробации на примере гидрохимических данных Северо-Домановичского месторождения рассмотрены ниже.

В качестве критериев разбавления пластовых рассолов закачиваемыми менее минерализованными водами в осложненных засолонением коллекторах необходимо было выбрать такие ионы, которыми не обогащаются попутные воды при растворении ими вторичных галитовых включений. Проведенные исследования показали, что к ним следует отнести ионы брома, калия, кальция и магния. Основным недостатком использования при этом первых двух перечисленных ионов заключается в том, что при проведении химического анализа вод (особенно попутных) они определяются достаточно редко. Когда такие данные имеются в наличии, их можно использовать для решения поставленной задачи. Кальций и магний определяется в

водах постоянно, однако следует учесть, что их содержание в попутных водах может измениться за счет процессов растворения карбонатных и сульфатных пород и включений, выпадения кальцита и гипса, а также процессов доломитизации и дедоломитизации известняков [1], [14]. Массовая обработка гидрохимических данных свидетельствует о том, что изменение состава вод за счет процессов растворения пород и (или) выпадения сульфатных и карбонатных минералов относительно невелики, и, как правило, не превышают 1–2 %. Влияние замены магния пород на кальций пластовых вод при дедоломитизации можно учесть, если использовать в качестве критерия смешения суммарное содержание ионов магния и кальция. В таком случае определить долю закачиваемых вод в попутно добываемых рассолах можно, используя для этих целей суммарное содержание ионов кальция и магния (подход 1), брома (подход 2) и калия (подход 3):

$$X = \frac{(Ca + Mg)_{пл} - (Ca + Mg)_{поп}}{(Ca + Mg)_{пл} - (Ca + Mg)_3}, \quad (3)$$

$$X = \frac{Br_{пл} - Br_{поп}}{Br_{пл} - Br_3}, \quad (4)$$

$$X = \frac{K_{пл} - K_{поп}}{K_{пл} - K_3}, \quad (5)$$

где $(Ca + Mg)_{пл}$, $(Ca + Mg)_{поп}$, $(Ca + Mg)_3$ – суммарное содержание ионов кальция и магния в пластовой, попутной и закачиваемой воде, мг/л; $Br_{пл}$, $Br_{поп}$, Br_3 – содержание ионов брома в пластовой, попутной и закачиваемой воде, мг/л; $K_{пл}$, $K_{поп}$, K_3 – содержание ионов калия в пластовой, попутной и закачиваемой воде соответственно, мг/л.

Для обоснования возможности практического использования предложенных подходов при расчетах значений коэффициента долевого участия закачиваемых вод в попутно добываемых рассолах проведено сопоставление значений коэффициента X , определенных по каждому из них, с величиной этого показателя, рассчитанного по более строгой, но и гораздо более сложной программе KANAL. Расчеты выполнены для наиболее представительных химических анализов попутных вод Северо-Домановичского месторождения. Результаты сопоставления позволяют сделать вывод о целесообразности использования в новых программах первый подход, основанный на сведениях по суммарному содержанию в водах ионов кальция и магния (рис. 1).

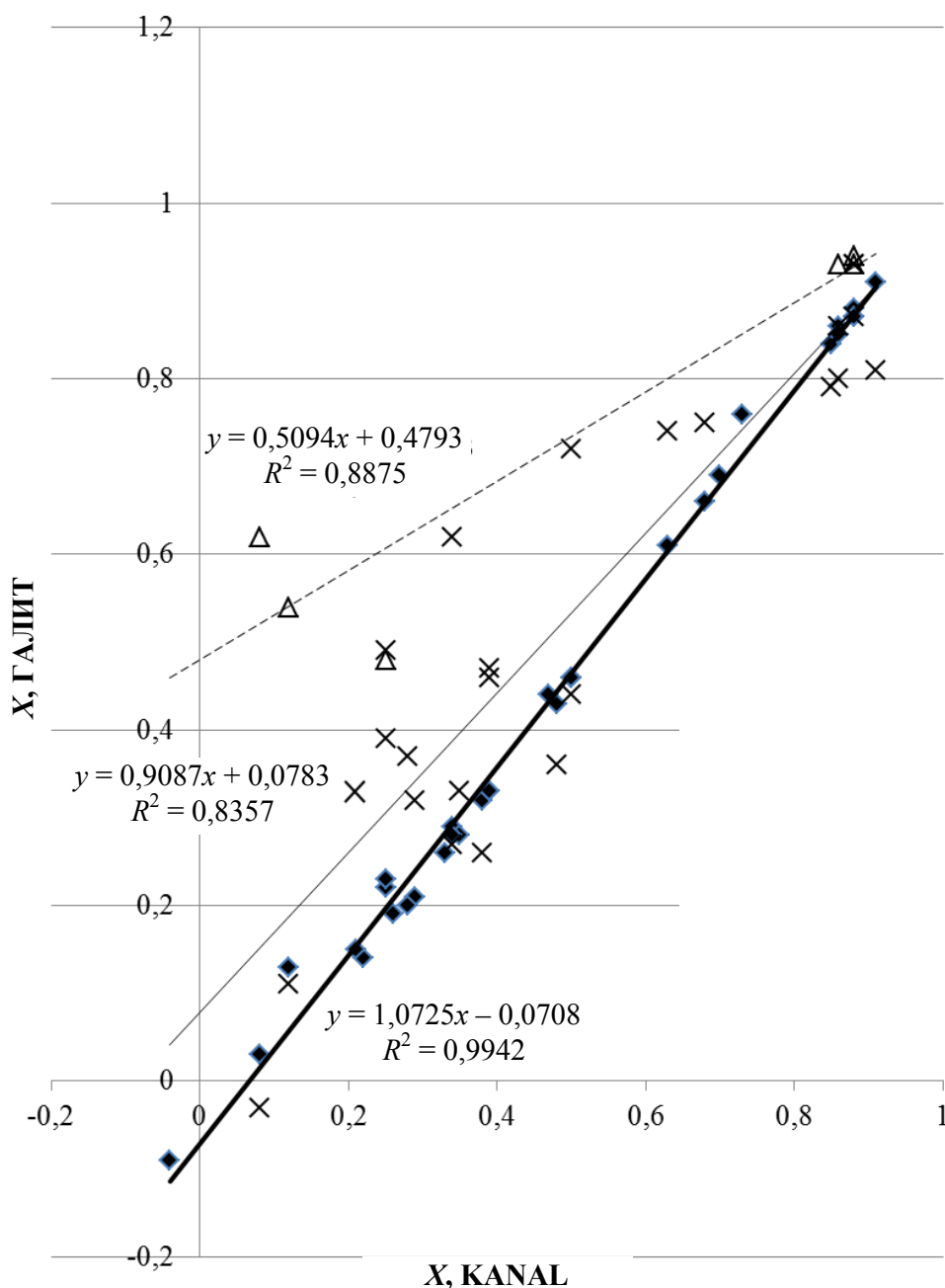


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета доли закачиваемой воды в попутно добываемых рассолах Северо-Домановичского нефтяного месторождения по различным методическим подходам:

- ◆ – новый подход 1; × – новый подход 2; △ – новый подход 3;
- — — — — линейная (новый подход 1); — — — — — линейная (новый подход 2);
- — линейная (новый подход 3)

Для проведения дальнейших расчетов по определению избыточных концентраций хлорида натрия в попутно добываемых с нефтью водах нами опробовано два способа, основанные на данных по содержанию в водах ионов натрия и сведений по их общей минерализации.

Прежде всего, для расчетов по первому из указанных способов следует определить избыточное количество натрия в попутно добываемой воде $Na_{изб}$ по формуле

$$Na_{изб} = Na_{поп} - Na_{теор} \tag{6}$$

где $Na_{\text{пол}}$ – фактическая концентрация ионов натрия в попутно добываемой воде, мг/л; $Na_{\text{теор}}$ – теоретическая (расчетная) концентрация натрия в смеси закачиваемой и пластовой воды, мг/л.

При определении теоретического содержания ионов натрия $Na_{\text{теор}}$ следует учесть степень разбавления пластовых рассолов закачиваемыми водами. В таком случае

$$Na_{\text{теор}} = Na_{\text{пл}}(1 - X) + Na_3 X, \quad (7)$$

где Na_3 и $Na_{\text{пл}}$ – соответственно содержание ионов натрия в закачиваемой и пластовой воде, мг/л.

Тогда избыточное содержание натрия в попутной воде может быть определено по формуле (6), а избыточное содержание хлорида натрия $NaCl_{\text{изб}}$ по формуле

$$NaCl_{\text{изб}} = 2,54 Na_{\text{изб}}, \quad (8)$$

где 2,54 – коэффициент, позволяющий по количеству натрия и молекулярной массе химических элементов (Na и Cl), входящих в формулу галита, рассчитать количество NaCl в растворе.

Количество растворенного и вынесенного из пласта галита $mNaCl$ по залежи (или участку залежи, контролируемому одной или группой добывающих скважин) за период времени предлагается [10]–[12], [14] определять по формуле

$$mNaCl = \sum C_{xi} NaCl_{\text{изб}} Q_i t, \quad (9)$$

где $C_{xi} NaCl_{\text{изб}}$ – избыточная концентрация хлористого натрия в попутной воде, добываемой из i -й скважины в период времени t , кг/м³; Q_i – дебит воды по i -й скважине в период времени t , м³/сут; t – время, сут.

Тогда объем фильтрационных каналов, образовавшихся в процессе выщелачивания выполнений галита при заводнении залежи составит:

$$Vy(t) = \frac{mNaCl}{\rho NaCl}, \quad (10)$$

где $Vy(t)$ – объем искусственных фильтрационных каналов, образовавшихся за период времени t в зоне дренирования y -й группой скважин, м³; $\rho NaCl$ – плотность галита – 2,15 г/см³.

На основании предложенной методики разработан алгоритм и составлена программа GALIT-1, реализованная в формате Excel.

Расчет избыточного содержания галита в попутных водах по второму из рассмотренных автором способов предлагается вести через избыточную минерализацию:

$$M_{\text{изб}} = M_{\text{пол}} - M_{\text{теор}}. \quad (11)$$

Величину теоретической минерализации предлагается определять по формуле

$$M_{\text{теор}} = M_{\text{пл}}(1 - X) + M_3 X, \quad (12)$$

где X – коэффициент долевого участия закачиваемых вод в попутно добываемых рассолах, определяемый по формуле (3).

Дальнейший расчет объемов растворенного в продуктивном пласте и выносимого попутными водами галита производится по формулам (9) и (10). При этом полагается,

что избыточная минерализация формируется за счет растворения вторичного галита и равна величине $\text{NaCl}_{\text{изб}}$. На основании предложенной методики также разработан алгоритм и составлена программа GALIT-M, реализованная в формате Excel.

Основными показателями, которые детально анализируются при оценке интенсивности протекающих в продуктивных пластах процессов рассоления пород-коллекторов, являются величина избыточного содержания в попутных водах хлорида натрия и объемы выносимого попутными водами галита. Они могут быть рассчитаны за определенный период или за все время эксплуатации добывающих скважин. Для оценки сопоставимости получаемых результатов расчетов этих показателей по различным методикам и компьютерным программам нами были проанализированы гидрохимические материалы по Северо-Домановичскому месторождению. По программе KANAL расчеты этих показателей проводились в лаборатории нефтепромышленной гидрогеологии БелНИПИнефть (А. А. Ефремова), по программам GALIT-1 и GALIT-M оценка выполнена автором. Расчеты проведены с использованием всех представительных анализов попутных вод, представленных специалистами БелНИПИнефть. Сопоставление результатов расчета избыточных концентраций NaCl в попутных водах приведено на рис. 2. Приведенные материалы указывают на достаточно высокую сходимость результатов, полученных по всем трем программам, что позволяет рекомендовать предложенные нами методы для широкого использования.

Если рассматривать результаты расчетов с практической точки зрения, то следует отметить, что наибольший интерес представляют результаты по обводнившейся преимущественно закачиваемыми водами скважине 25. Попутные воды этой скважины представляют собой смесь закачиваемых (около 86 %) и пластовых (около 14 %) рассолов, обогащенную большим количеством растворенного в пластовых условиях хлорида натрия. Полученные материалы свидетельствуют об очень высоких концентрациях избыточного NaCl во всех отобранных и проанализированных пробах попутных вод из данной скважины. Так, в первой половине 2015 г. величина этого показателя превышала 200 грамм в каждом литре добытых с нефтью попутных вод. В пробе, отобранной в марте 2019 г., она заметно снизилась, но все же представляет весьма значительную величину, которая оценивается почти в 140 г/л.

Суммарный объем растворенного в продуктивных пластах и вынесенного с попутно добываемой водой рассматриваемой скважины галита оценивается в 3,9 тыс. м³. Последнее говорит о том, что продвижение закачиваемых вод к забою скважины происходит через засолоненный коллектор, а также свидетельствует о высокой интенсивности растворения аутигенных галитовых выполнений трещин, пор и каверн на путях перемещения закачиваемых вод к скважине 25. Связано это не только с высокой степенью засолоненности коллектора, но и с низкой минерализацией закачиваемых вод и высокой долей последних в попутно добываемых рассолах. Однако если на первом этапе заводнения объемы закачиваемых вод, проходящие по засолоненному коллектору, были относительно невелики (и вода успевала в значительной степени насытиться хлоридами натрия), то в дальнейшем фильтрационные каналы начали более интенсивно промываться, что привело к уменьшению фильтрационных сопротивлений и повышению обводненности добываемой с нефтью продукции. За временную границу, разделяющую два рассматриваемые этапа, следует принять время начала резкого постоянного снижения плотности попутных вод (конец 2017 г.) достаточно хорошо прослеживаемого на графике изменения плотности попутных вод в процессе эксплуатации скважины 25 (рис. 3). Можно уверенно утверждать, что этот процесс при неизменных особенностях разработки данного участка залежи будет продолжаться еще длительное время.

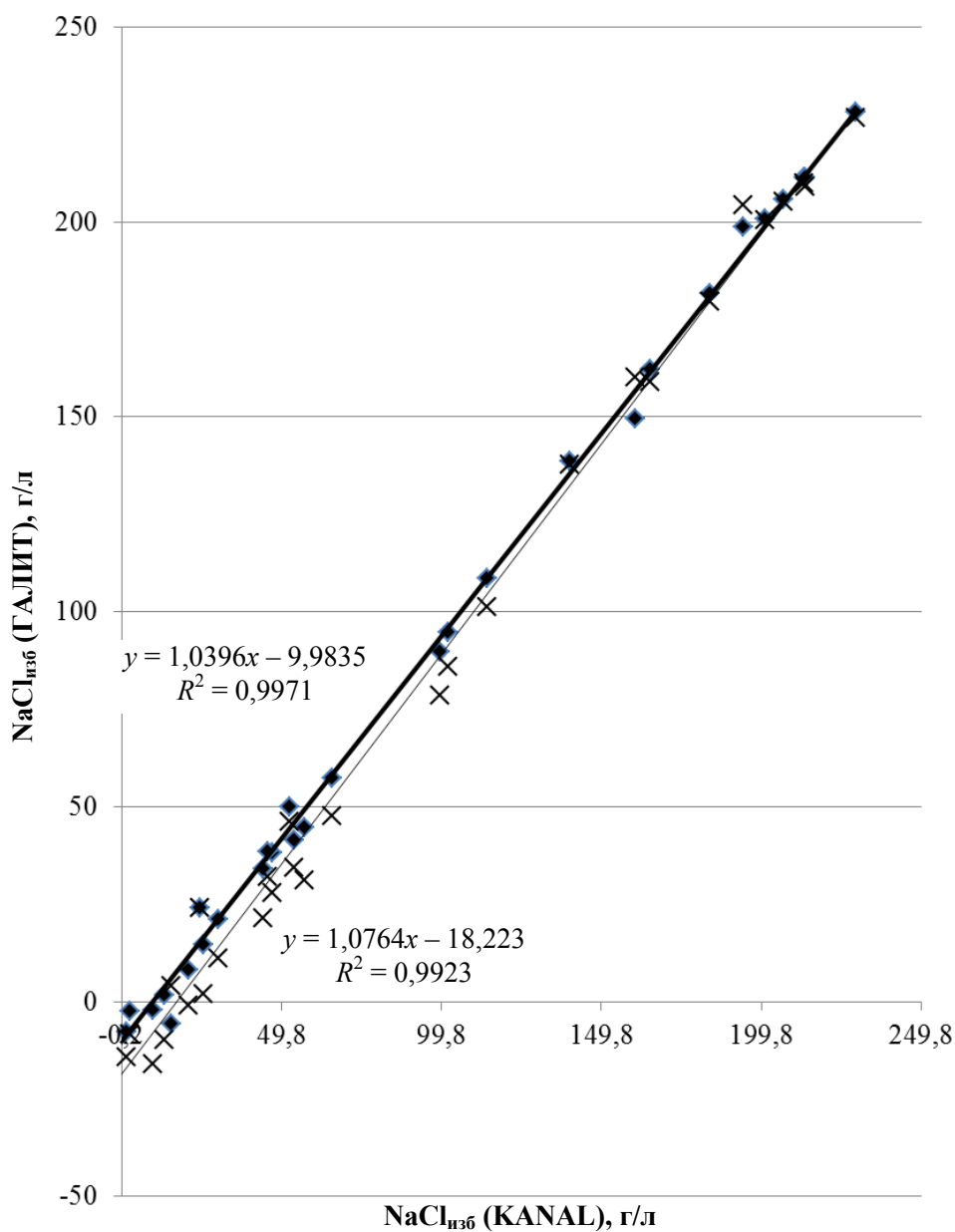


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета избыточных концентраций хлорида натрия в попутных водах Северо-Домановичского месторождения по различным программам: \blacklozenge – Галит-1; \times – Галит-М; — – линейная (Галит-1); — – линейная (Галит-М)

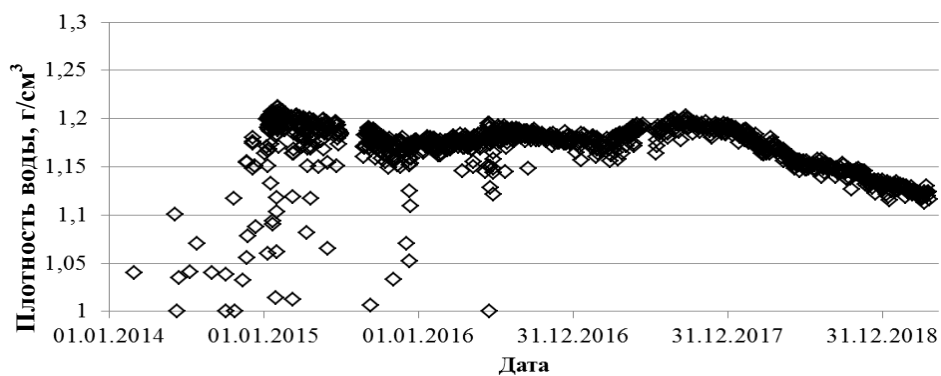


Рис. 3. Изменение плотности попутных вод скважины 25 Северо-Домановичской в процессе ее эксплуатации

Для снижения интенсивности промывки фильтрационных каналов от катагенетического галита может быть рекомендована смена направлений фильтрационных потоков (перенос фронта нагнетания). Дополнительно к этому рекомендуется увеличение плотности закачиваемых вод до значений 1,17–1,18 г/см³ в нагнетательной скважине (скважинах), оказывающей основное влияние на добывающую скважину 25. При этом необходимо будет усилить гидрохимический контроль за проведением этих мероприятий.

Заключение

Проведенные исследования позволили автору разработать новые способы обработки гидрохимических данных с целью оценки изменения ФЕС засоленных пород при эксплуатации добывающих скважин и подготовить на их основе программы GALIT-1 и GALIT-M, реализованные в формате Excel.

Основными показателями, которые детально анализируются при оценке интенсивности протекающих в продуктивных пластах процессов рассоления пород-коллекторов, являются величина избыточного содержания в попутных водах хлорида натрия и объемы выносимого попутными водами галита. Расчеты этих показателей проведены по различным программам с использованием всех представительных анализов попутных вод Северо-Домановичского месторождения. Сопоставление полученных данных показало, что результаты по каждой из предложенных автором программ мало отличаются от результатов расчета по достаточно сложной и неустойчиво работающей в настоящее время программе KANAL.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют результаты по скважине 25. Они свидетельствуют об очень высоких избыточных концентрациях хлорида натрия во всех пробах попутных вод (более 140 г/л). Суммарный объем вынесенного галита по данной скважине оценивается в 3,9 тыс. м³. Это указывает на продвижение закачиваемых вод к забою добывающей скважины через засоленный коллектор, а также свидетельствует о высокой интенсивности растворения аутигенных галитовых выполнений трещин, пор и каверн на путях перемещения закачиваемых вод к скважине 25. Проведенные исследования позволили автору предложить мероприятия, направленные на снижение негативного влияния процесса растворения вторичного галита на разработку межсолевой залежи Северо-Домановичского месторождения.

Литература

1. Порошин, В. Д. Методы обработки и интерпретации гидрохимических данных при контроле разработки нефтяных месторождений / В. Д. Порошин, В. В. Муляк. – М. : Недра, 2004. – 220 с.
2. Порошин, В. Д. Ионно-солевой состав вод эвапоритсодержащих осадочных бассейнов в связи с поисками, разведкой и разработкой нефтяных и газовых месторождений : автореф. дис. д-ра геолого-минерал. наук / В. Д. Порошин. – М. : ГАНГ, 1997. – 44 с.
3. Гидрохимические методы анализа и контроля разработки нефтяных и газовых месторождений / В. В. Муляк [и др.]. – М. : ГЕОС, 2007. – 245 с.
4. Коцур, В. В. Основные направления борьбы с осадками минеральных солей в нефтескважинах на месторождениях РУП «ПО «Белоруснефть» / В. В. Коцур, А. А. Ефремова // Теория и практика современных методов интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи пластов : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : Полеспечать, 2012. – С. 563–567.

5. Ефремова, А. А. Гидрохимические методы оценки вероятности образования и осаждения минеральных солей на подземном оборудовании добывающих скважин / А. А. Ефремова, А. Г. Морозов, А. Э. Сенкевич // *Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь* : сб. науч. тр. / БелНИПИнефть. – Минск, 2007. – Вып. 9. – С. 432–438.
6. Букаты, М. Б. Равновесие высокоминерализованных подземных рассолов с эвапоритовыми минералами / М. Б. Букаты, С. Л. Шварцев // *Сов. геология*. – 1983. – № 8. – С. 114–123.
7. Причины засоления нефтегазоносных комплексов на юге Сибирской платформы / М. Б. Букаты [и др.] // *Геология и геофизика*. – 1981. – № 9. – С. 17–27.
8. Вожов, В. И. Вторичное минералообразование в венд-кембрийских отложениях Непско-Ботуобинской антиклизы / В. И. Вожов, Л. С. Чернова // *Геология нефти и газа*. – 1999. – № 11. – С. 10–16.
9. Чертовских, Е. О. Отложения галита при добыче нефти на Верхнечонском нефтегазоконденсатном месторождении / Е. О. Чертовских, В. А. Качин, А. В. Карпиков // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. – 2013. – № 5 (76). – С. 82–91.
10. Порошин, В. Д. Изменение емкостных и фильтрационных свойств пород коллекторов в процессе разработки нефтяных месторождений Беларуси / В. Д. Порошин // *Геология нефти и газа*. – 1996. – № 9. – С. 43–48.
11. Порошин, В. Д. Гидрогеохимическая оценка масштабов катагенетического галитообразования в отложениях соленосных осадочно-породных бассейнов и ее практическое значение / В. Д. Порошин // *ДАН Беларуси*. – 1996. – Т. 40, № 6. – С. 100–104.
12. Poroshin, V. D. Hydrochemical control of oil pool development (illustrated with Belarusian oil fields). Part III / V. D. Poroshin, V. V. Mulyak, V. P. Khainak // *INDIAN JOURNAL OF PETROLEUM GEOLOGY*. – Vol. 12, № 2 (December, 2003). – P. 1–6.
13. Козырева, С. В. Гидрохимическая оценка масштабов рассоления коллекторов при разработке западного и восточного участков семилукской залежи нефти Осташковичского месторождения / С. В. Козырева, Н. А. Овсянников, С. Л. Порошина // *Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления* : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 204–207.
14. Порошин, В. Д. Взаимодействие в системе порода-вода при разработке залежей нефти в подсолевых и межсолевых отложениях (на примере Припятского прогиба) / В. Д. Порошин, В. П. Хайнак // *Литология и полезные ископаемые*. – 2000. – № 5. – С. 544–553.

Получено 22.11.2019 г.