

КАРЫСНЫЯ ВЫКАПНІ

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЙОДА И БРОМА В ПОПУТНЫХ ВОДАХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЕЛАРУСИ ПРИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В. Д. Порошин, С. Л. Порошина

УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого»
 проспект Октября, 48, 246746, Гомель, Беларусь
 E-mail: poroshin-52@mail.ru

Впервые для условий нефтяных месторождений Республики Беларусь разработан гидрохимический метод оценки разубоживания попутных вод в процессе их использования в качестве гидроминерального сырья. Метод основан на прогнозе изменения концентраций промышленно ценных химических элементов в попутно добываемых с нефтью водах за счет изменения рассчитываемого для конкретных залежей долевого участия пластовых рассолов в заводнении продуктивных пластов и за счет разбавления ранее закачанных в залежь вод отработанными (после извлечения ценных компонентов) водами. Апробация предложенного метода рассматривается на примере прогноза на десятилетний период (2021–2030 гг.) изменения содержаний йода и брома в попутных водах самой крупной в Беларуси межсолевой залежи нефти Осташковичского месторождения при извлечении из них этих элементов и закачки отработанных вод в нагнетательные скважины.

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование природных ресурсов, отраженное в классификации запасов и ресурсов нефти и природного газа, основывается на комплексном изучении месторождений. В значительной мере оно определяется вовлечением в промышленное освоение, наряду с нефтью и газом, попутных ископаемых и компонентов. К одному из видов попутных полезных ископаемых относятся пластовые воды продуктивных и водоносных горизонтов, а также попутно добываемые воды нефтяных месторождений, содержащие повышенные концентрации йода, брома, бора, соединения калия, лития, рубидия, стронция и других компонентов, которые могут рассматриваться в качестве гидроминерального сырья для промышленного получения этих элементов и их соединений.

Имеющиеся сведения о составе попутных вод нефтяных месторождений Беларуси свидетельствуют о том, что они являются поликомпонентным гидроминеральным сырьем высокого качества. Концентрации брома в попутно добываемых с нефтью водах достигают 2–3 г/л, йода 40–50 мг/л, отмечаются также весьма высокие содержания в них ряда других промышленно ценных элементов. Проведенные ранее работы по технико-экономическому обоснованию применения попутных вод в качестве гидроминерального сырья (для извлечения йода и брома) и выполненный подсчет эксплуатационных запасов и потенциальных ресурсов этих элементов в попутных водах нефтяных месторождений Бела-

руси показали, что их вполне достаточно для организации промышленного производства [1; 2; 3; 4].

За годы, прошедшие после проведенной оценки эксплуатационных запасов и ресурсов попутных вод, произошли существенные изменения в ресурсной базе. Отмечаемый постоянный рост степени обводнения добываемой продукции, притом что в последние годы происходит увеличение объемов добычи нефти, позволяет полагать, что объемы попутно добываемых с нефтью вод в обозримом будущем будут также расти. В настоящее время при разработке нефтяных месторождений Республики Беларусь ежегодно извлекается более 6,7 млн м³ попутных вод, содержащих промышленные концентрации йода, брома и других элементов. Учитывая то, что извлечение попутных вод не требует строительства дорогостоящей инфраструктуры (скважин, систем сбора, транспорта и т. п.) и дополнительных затрат на подъем гидроминерального сырья на поверхность и утилизацию отработанных отходов, возможность использования их в качестве гидроминерального сырья в значительной степени определяется содержанием промышленно-ценных компонентов в этих водах, их запасами и ресурсами [5]. Поэтому при рассмотрении вопросов целесообразности использования попутных вод в качестве гидроминерального сырья первоочередное значение приобретает знание текущего и прогнозного состояния его сырьевой базы.

В 2021 г. в БелНИПИнефть с привлечением сотрудников ГГТУ им. П. О. Сухого проведена научно-исследовательская работа по оценке текущих

запасов и ресурсов брома и йода в попутно добываемых с нефтью водах по ряду наиболее крупных залежей нефти Припятского прогиба и прогнозу их изменения в случае запуска в работу предприятий по их переработке. В целях решения данной задачи проведена обработка и интерпретация сведений о химическом составе попутных вод за весь срок разработки залежей, рассчитаны концентрации, оценены запасы и ресурсы рассматриваемых компонентов по состоянию на указанную дату, сделан прогноз изменения ресурсной базы до 2030 г. при использовании попутных вод рассмотренных залежей для извлечения йода и брома [5].

Одна из наиболее сложных задач, связанная с оценкой изменения ресурсной базы промышленно ценных элементов при использовании попутных вод нефтяных месторождений в качестве гидроминерального сырья, состояла в необходимости учета процесса их разубоживания при закачке в продуктивные пласты отработанных вод после извлечения из них конкретных компонентов. Эти сложности обусловлены, прежде всего, необходимостью учета особенностей геологического строения и гидрогеологических условий месторождений, применяемых систем их разработки и технологий добычи углеводородного сырья, которые в разных нефтедобывающих регионах существенно различаются [6; 7; 8; 9]. В связи с этим до настоящего времени не существует регламентирующих методических документов, пригодных для любого нефтедобывающего региона, по оценке влияния процесса разубоживания попутно добываемых совместно с нефтью вод на изменение концентраций конкретных полезных компонентов. Решение данной задачи для условий нефтяных месторождений нашей республики осложняется еще и тем, что они связаны с засоленными коллекторами. Это приводит к более сложному формированию состава попутных вод в процессе их разработки по сравнению с месторождениями большинства других нефтедобывающих регионов и необходимости учета данных особенностей при прогнозе степени разубоживания попутных вод в процессе извлечения из них каких-то компонентов.

Авторами статьи предлагается решать данную задачу с помощью изложенного ниже методического подхода, основанного на результатах обработки и интерпретации гидрохимических и нефтепромысловых данных.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенная ранее детальная обработка данных по химическому составу пластовых, закачиваемых

и попутных вод нефтяных месторождений Беларуси позволила провести оценку долевого участия пластовых и закачиваемых вод в попутно добываемых рассолах для целого ряда разрабатываемых белорусских месторождений. Анализ карт распределения показателей смешения закачиваемых и пластовых вод, отмечающегося при разработке нефтяных залежей, а также графиков изменения величины этих показателей во времени указывает на то, что каждая залежь характеризуется своими особенностями, которые могут быть использованы при решении поставленной задачи. Отмечено, что многие залежи характеризуются определенным долевым участием пластовых рассолов в составе попутно добываемых вод [10]. При этом для одних залежей эта величина относительно постоянная и практически не изменяется за время разработки залежи, для других отмечается тенденция к ее снижению или росту, что определяется особенностями геологического строения залежей и сложившейся системой их разработки. Данное положение предлагается учитывать при решении задачи по оценке процесса разубоживания попутных вод в случае их использования в качестве гидроминерального сырья.

При решении данной задачи мы исходили из того, что в процессе разработки месторождений концентрации промышленно-ценных компонентов в окружающих залежи нефти пластовых рассолах остаются практически неизменными. Поэтому, зная доленое участие пластовых рассолов в попутно добываемых водах, можно прогнозировать нижний предел содержащихся в них компонентов на предстоящий период разработки залежей ($C_{\min}$). Эта величина может изменяться лишь при изменении показателя, отражающего долю пластовых рассолов в попутно добываемых водах. Поэтому первоочередной задачей проводимых исследований является прогноз величины данного показателя по конкретным залежам на период работы предприятия по переработке гидроминерального сырья.

Для расчета объема внедрившихся в залежь пластовых рассолов по имеющимся гидрохимическим данным с помощью разработанных нами методических подходов и расчетных модулей Галит-1 и Галит-1т определяется величина X – доля закачиваемых, а соответственно, и пластовых $X_1 = (1 - X)$ вод в попутно добываемых [11; 12; 13].

По результатам проведенных расчетов предлагается строить графики изменения долевого участия пластовой воды в попутно добываемых рассолах во времени и вычислять средние значения анализируемого показателя за определенные промежутки времени. Анализ этих материалов позволит сделать прогноз минимально возможных концентраций полезных компонентов ($C_{\min}$) в попутных

водах во время использования последних в качестве гидроминерального сырья как произведение концентрации этих компонентов в пластовых рассолах ($C_{пл}$) и коэффициента долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах:

$$C_{min} = C_{пл} X_1. \quad (1)$$

В остающемся в залежи объеме ранее закачан- ных вод, концентрации полезных компонентов бу- дут снижаться за счет разубоживания отработан- ной (после извлечения этих компонентов) водой, которая будет использоваться в системе ППД. Для оценки объемов этих вод в залежах нам необходимо знать величину ресурсов попутных рассолов и ди- намику изменения коэффициента долевого участие в них закачиваемых вод X .

Для оценки объема вод (Q_1), ранее закачанных и оставшихся в залежи, вначале рассчитывается объем (Q_v) всех вод в залежи (ресурсы вод), кото- рый равен объему добытой нефти (Q_n), переведен- ному в пластовые условия:

$$Q_v = \frac{Q_n}{\rho_n} b, \quad (2)$$

где b – объемный коэффициент;

ρ_n – плотность дегазированной нефти, г/см³.

Объем остающихся в залежи закачанных вод определяется (Q_1) как произведение величины (Q_v) и средневзвешенной величины X по заводненной части залежи:

$$Q_1 = Q_v X. \quad (3)$$

Снижение концентраций анализируемых ком- понентов в этих водах рекомендуется оценивать пу- тем учета закономерности смешения больших объ- емов находящейся в залежи ранее закачанной воды (значительной доли ресурсов попутных вод) с отно- сительно небольшими годовыми объемами сбрасы- ваемых в продуктивные пласты отработанных по- путных вод, обедненных микрокомпонентами. При этом, как мы видели выше, в расчеты следует при- нимать не все ресурсы, а только их часть (Q_1), опре- делить которую можно и как разность между объ- емом ресурсов попутных вод по залежи, и объемом находящихся в залежи пластовых рассолов:

$$Q_1 = Q_v - Q_{пл}. \quad (4)$$

Следует отметить, что величина этой доли ре- сурсов не является постоянной и будет расти за счет восполнения объема добытой из залежи нефти за- качиваемыми водами ($Q_{зак}$). Величину ежегодного прироста (Q_1), т. е. величину (Q_v) можно опреде- лить по формуле (2).

Для оценки содержаний отдельных компонен- тов в смеси двух разных по составу вод предлагается

использовать формулу А. Р. Ахундова и Ш. Ф. Мех- тиева, основанную на линейной зависимости содер- жания компонентов от пропорций смешивающихся вод [14]. Для решения нашей задачи она будет иметь следующий вид:

$$C_2 = (C_1 - C_{ост}) X_2 + C_{ост}, \quad (5)$$

где X_2 – объемная доля 1-й воды (Q_1) в составе сме- си ($Q_1 + Q_{зак}$);

C_1 – начальное содержание какого-либо компо- нента в составе 1-й воды (в закачанной ранее и ос- тающейся в залежи воде);

$C_{ост}$ – содержание этого же компонента в соста- ве 2-й воды (отработанной воде, после извлечения ценных компонентов и вновь закачанной в залежь в текущем году);

C_2 – содержание этого компонента в составе смеси вод этих вод.

Формула (5) справедлива для тех случаев, когда не происходит процессов взаимодействия вод с по- родой и не отмечается выпадения осадков с участи- ем анализируемых компонентов. Расчеты должны проводиться по так называемым консервативным компонентам, которые практически не сорбируются породами и коллоидными системами, не дают труд- норастворимых соединений и не усваиваются био- логическим путем [6; 7; 8]. Как известно, бром и йод можно отнести к консервативным элементам, соот- ветственно, расчеты уверенно можно проводить по формуле (5).

Для расчета величины X_2 вначале необходимо определить (Q_2) – суммарный объем смеси вод (Q_1) и годового объема закачиваемых вод ($Q_{зак}$) (6), а за- тем определить объемную долю воды (Q_1) в соста- ве смеси (7):

$$Q_2 = Q_1 + Q_{зак}. \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{Q_1}{Q_2}. \quad (7)$$

Начальное содержание какого-либо компонен- та в закачанной ранее и остающейся в залежи воде, при условии отсутствия в залежи пластовых рассо- лов (C_1), определяется как разница между концен- трациями этих компонентов в попутной воде и C_{min} :

$$C_1 = C_{поп} - C_{min}. \quad (8)$$

Чтобы определить величину $C_{ост}$ – содержание этого же компонента в отработанной воде, после из- влечения ценных компонентов, необходимо знать долю не извлекаемой (остаточной) их concentra- ции ($X_{техн}$), что зависит от применяемой техноло- гии извлечения этих компонентов. В таком случае:

$$C_{ост} = C_1 X_{техн}. \quad (9)$$

Зная концентрацию ценного компонента по состоянию на конкретную дату в попутных водах, определяемую наличием пластовых рассолов ($C_{\min}$) и величину этой концентрации, определяемую наличием в пластах ранее закачанных вод (C_2) можно рассчитать прогнозируемое содержание рассматриваемых компонентов:

$$C = C_{\min} + C_2. \quad (10)$$

Иными словами, концентрация рассматриваемых элементов в попутных водах будет определяться как сумма минимально возможной их величины, обусловленной долей пластовых рассолов, и расчетной величины концентрации, обусловленной долей ранее закачанных и оставшихся в залежи вод.

С применением вышеизложенного алгоритма решения задачи по оценке изменения концентраций отдельных компонентов в процессе разубоживания попутно добываемых с нефтью вод, составлен расчетный модуль, который использовался для решения стоящей задачи по ряду наиболее крупных разрабатываемых нефтяных залежей Беларуси.

АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Апробацию предложенного методического подхода рассмотрим на примере самой крупной в Беларуси межсолевой залежи нефти Осташковичского месторождения, по которой в БелНИПИнефть параллельно проводилось компьютерное моделирование процесса разубоживания концентраций йода и брома с использованием гидродинамической модели.

В целях выяснения особенностей заводнения межсолевой залежи нефти Осташковичского месторождения различными типами вод в последние десятилетия и прогноза возможных изменений состава попутных вод на ближайшие 10 лет (при их использовании в качестве гидроминерального сырья) нами проведена детальная обработка имеющихся нефтепромысловых гидрохимических данных за 1994–2021 гг. Для этого, прежде всего, были построены графики изменения плотностей попутных вод для всех добывающих скважин за время их эксплуатации с нанесением на них сведений о плотностях, полученных при проведении химического анализа этих вод. Примеры таких графиков приведены на рисунке 1.

Анализ этих графиков позволил создать две выборки результатов химического анализа, которые характеризуют состав вод, обводняющих скважины, и вод, обводняющих продукцию по ранее разработанному методическому подходу [13]. Проведенная обработка гидрохимических данных позволила определиться с методическими приемами проводимых расчетов.

Для характеристики состава пластовых рассолов межсолевого нефтегазоносного комплекса Осташковичского месторождения использовались результаты химического анализа вод, отобранных при испытании поисковых и разведочных скважин рассматриваемого месторождения. При этом из всех имевшихся ранее [15] и новых данных были выделены по разработанным ранее критериям разбраковки [16; 17; 18] наиболее представительные, которые использовались для определения корректных значений концентраций кальция, магния, натрия и калия в пластовых водах рассматриваемого месторождения.

В целях обоснования концентраций анализируемых компонентов в закачиваемых водах был построен график изменения плотности вод, закачиваемых в залежь через нагнетательные скважины, с нанесением на него сведений о плотностях вод блочной кустовой насосной станции БКНС-3 (рис. 2).

Отсутствие данных по плотностям закачиваемых вод до 1994 г. по нагнетательным скважинам не позволяет корректно решить вопрос о составе закачиваемых в залежь вод и, соответственно, проводить расчеты показателей долевого участия пластовых и закачиваемых вод в попутно добываемых за этот период. Поэтому в дальнейшем обработка гидрохимических данных по этой и другим залежам проводилась с использованием более поздних результатов изучения химического состава закачиваемых и попутных вод.

На рисунке 2 хорошо видно, что с 1994 по 2013 г. плотности закачиваемых вод в нагнетательные скважины и вод БКНС-3 заметно различаются. Для данного периода времени наблюдается рост плотностей закачиваемых вод, но их плотность заметно ниже, чем плотность вод БКНС-3. С учетом этого были обоснованы средние концентрации щелочных и щелочноземельных элементов в закачиваемых водах первого из рассматриваемых расчетных периодов. В последующий период плотности закачиваемых вод и вод БКНС-3 оказались сопоставимыми, что послужило обоснованием при выборе наиболее представительных химических анализов для определения содержания кальция, магния, натрия и калия в закачиваемых водах второго периода.

Проведенная обработка гидрохимических данных позволила провести расчеты величины показателя долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах по каждому из анализов их химического состава. Расчеты проводились с использованием методических приемов Галит-1 и Галит-1т.

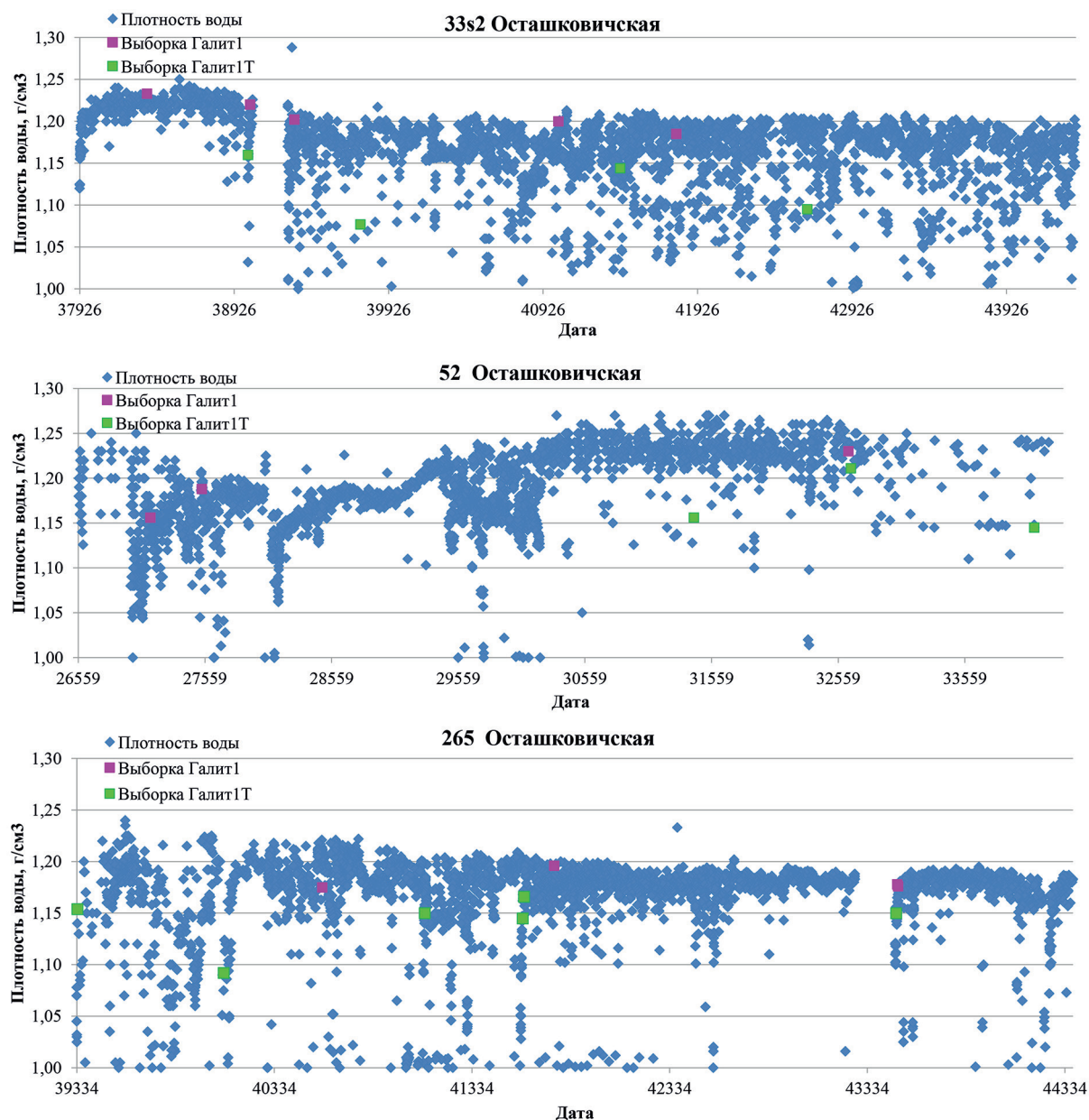


Рисунок 1 – Изменение плотности попутных вод по скв. 33s2, 52, 265 Осташковичского месторождения

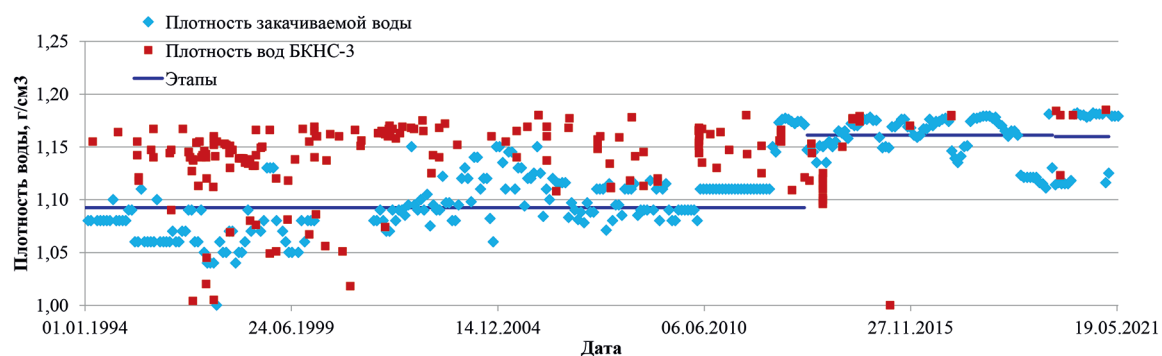


Рисунок 2 – Осташковичское месторождение нефти. Изменение плотности закачиваемых вод с 1994 по 2021 г.

Следует полагать, что с участками более активного внедрения в залежь пластовых рассолов следует связывать более высокие концентрации йода и брома. Это достаточно явно прослеживается на графиках зависимости концентраций брома и йода в попутных водах от долевого участия в них пластовых рассолов (рис. 3). Широкий разброс точек на построенных графиках объясняется прежде всего тем, что химический состав закачиваемых вод за время эксплуатации залежи формировался за счет поступления попутных вод из месторождений всего второго нефтепромысла и разбавления этих вод в разной степени сточными водами. При этом следует учесть, что химический состав пластовых вод залежей этих месторождений заметно различается.

Рассматривая приведенные графики, можно заметить, что линии установленных зависимостей пересекают ось концентраций брома при значениях около 1000 мг/л, а ось йода около 10 мг/л, что отражает средние содержания этих элементов в закачиваемых водах за анализируемый период. При долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах равном единице концентрации брома по зависимости составляют около 2400–2500 мг/л, а йода около 46–47 мг/л, что примерно соотносится с содержанием этих элементов в пластовых рассолах (2587 и 47,7 мг/л соответственно). Такое совпадение не случайно, оно подтверждает верность наших представлений о зависимости концентраций ценных компонентов в попутных водах от долевого участия в их составе пластовых рассолов и свидетельствует о достаточной обоснованности предлагаемого методического подхода по прогнозу разубоживания гидроминерального сырья.

Для прогноза возможных изменений концентраций полезных компонентов в попутно добываемых водах рассматриваемой залежи нефти до 2030 г. построены графики изменения величины долевого участия в них пластовых рассолов за последние 27 лет (рис. 4). Отмечено, что четкой закономерности изменения данного показателя за анализируемый период времени не наблюдается. Это преимущественно связано с отбором проб попутных вод из скважин, расположенных в участках с различной долей в них пластовых рассолов и закачкой в продуктивные пласты вод различного химического состава.

Несмотря на это, на графиках четко отмечается тенденция снижения доли пластовых рассолов в попутных водах. Об этом же говорит и сравнение средневзвешенных значений долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах за вышеприведенные периоды времени (0,42 и 0,38 соответственно). Казалось бы, установленная осо-

бенность должна указывать на снижение концентраций брома и йода в попутно добываемых водах со временем, но этого не наблюдается. Последнее связано с тем, что при снижении содержания рассматриваемых элементов в доле пластовых рассолов отмечался постоянный рост их концентраций в закачиваемой воде.

При работе предприятия по извлечению йода и брома из попутных вод в продуктивные пласты будут закачиваться отработанные воды с низкими концентрациями этих элементов, к тому же доля пластовых рассолов в попутных водах также будет несколько снижаться, что приведет к ухудшению качества используемого гидроминерального сырья.

Исходя из установленной тенденции снижения доли пластовых рассолов, будем полагать, что за прогнозируемый период она будет изменяться по зависимости, отраженной на рисунке 4. В таком случае минимально возможные концентрации брома и йода в попутных водах (при отсутствии этих элементов в доле закачанной воды) составят $(2587 \times 0,312)$ 806,94 мг/л брома и 14,87 йода соответственно к концу первого года работы предприятия по извлечению йода и брома (табл. 1). В дальнейшем расчете минимальных концентраций йода и брома по состоянию на конец каждого последующего года используются значения X_1 , получаемые по ранее установленной зависимости (см. рис. 4).

При использовании попутных вод в качестве гидроминерального сырья средняя концентрация брома в доле закачанной воды будет снижаться в соответствии с изменением величины X_2 . Она определяется как отношение объема закачанной и остающихся в залежи вод Q_1 к Q_2 – сумме объемов закачанной (и остающейся в залежи) воды и годовой закачки отработанной воды.

Объем закачанной и остающихся в залежи вод Q_1 может быть определен как произведение суммарных ресурсов попутных вод по данной залежи и коэффициента долевого участия закачиваемых вод в попутно добываемых X ($44\,460,61 \times 0,668 = 30\,592,35$ тыс. м³). В целях оценки объема, заполненного вместо добытой нефти пластовой и закачанной водой за рассматриваемый год, годовая добыча нефти по состоянию на конец расчетного года переведена в пластовые условия по формуле (2) и составила 213,66 тыс. м³. В таком случае суммарный объем вод Q_2 определяется по уравнению (9) – 32 764,35 тыс. м³, а величина X_2 по уравнению (10) – 0,933.

При прогнозе величины концентраций ценных элементов в остающейся в залежи воде должны учитываться концентрации рассматриваемых микрокомпонентов в отработанных водах, которые будут закачиваться в залежь для ППД уже после их извлечения.

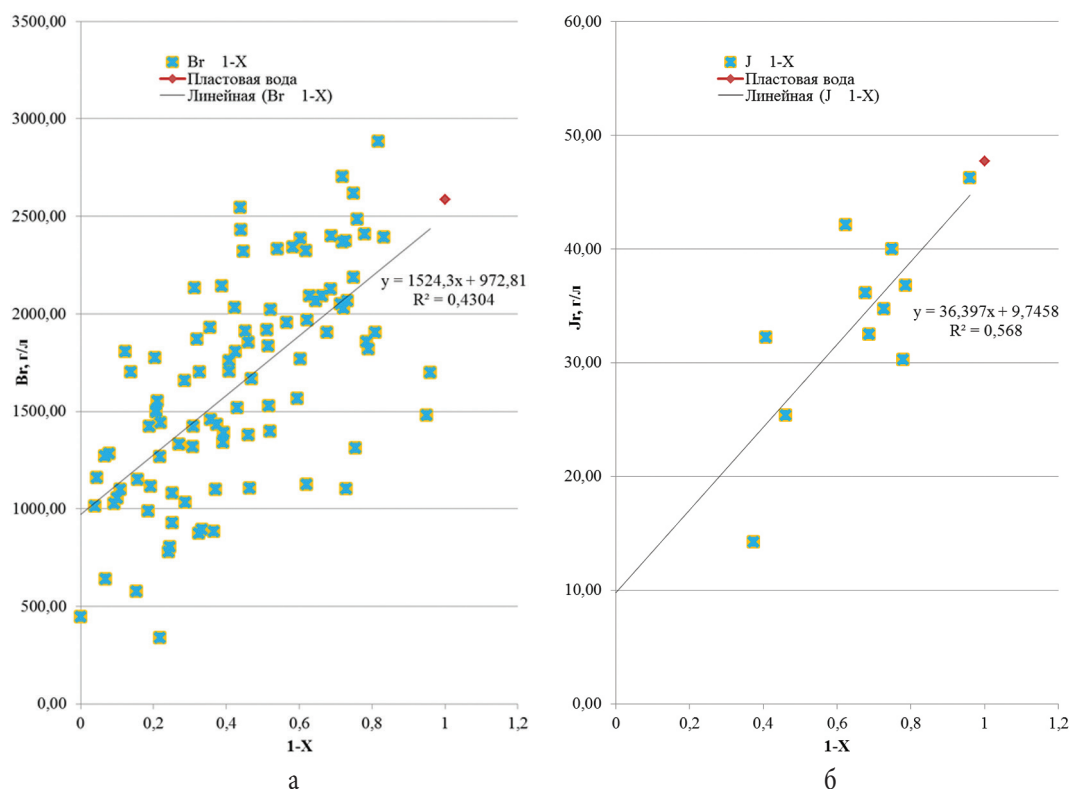


Рисунок 3 – Зависимость осредненных по скважинам концентраций брома (а) и йода (б) в попутных водах межслоевой залежи нефти Осташковичского месторождения от долевого участия в них пластовых рассолов

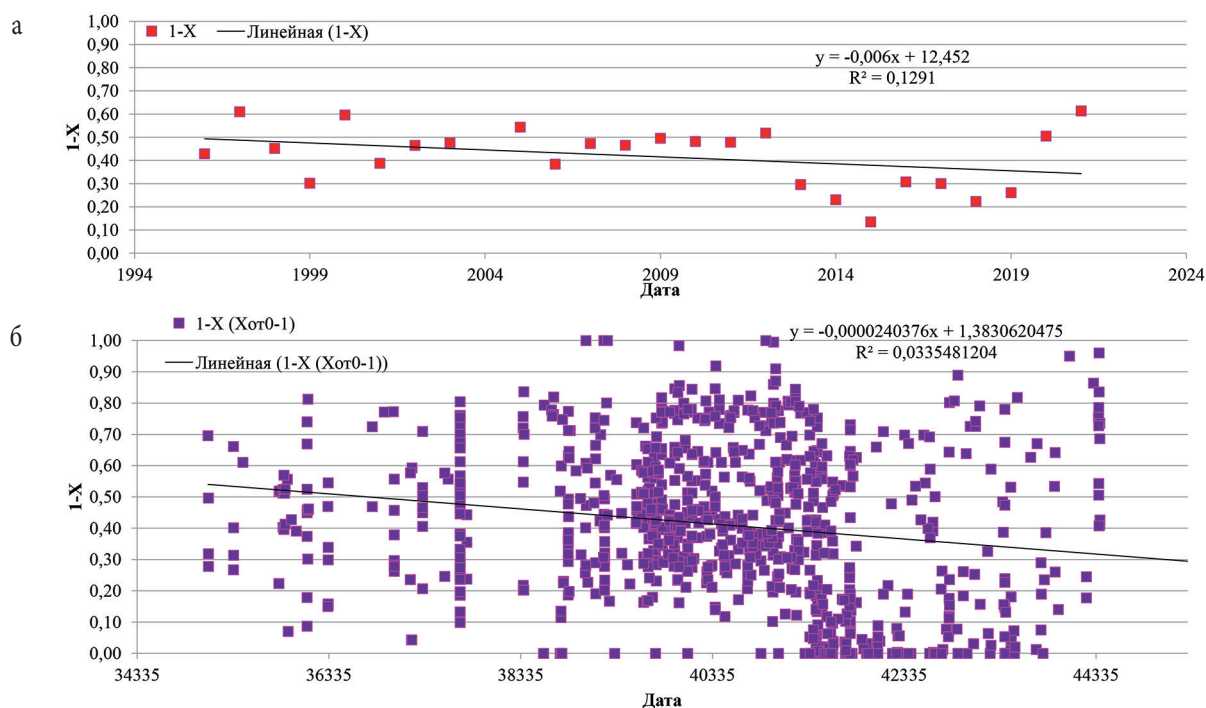


Рисунок 4 – Изменение величины долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах петриковско-законской залежи нефти Осташковичского месторождения: по среднегодовым значениям (а), по замерам (б)

Таблица 1 – Результаты оценки изменения концентраций йода и брома в попутных водах петриковско-задонской залежи нефти
Осташковского месторождения до 2030 г. (текущие концентрации на 01.01.2021)

Год	$C_{\text{пр}}, \text{мг/л}$	$X_1 = (1 - X)$	$C_{\text{мин}}, \text{мг/л}$	$Q_{\text{н}}, \text{тыс. т}$	$Q_{\text{с.л.}}, \text{тыс. м}^3$	$\Sigma Q_{\text{с.л.}}, \text{тыс. м}^3$	$\Sigma Q_{\text{в.}}, \text{тыс. м}^3$	$Q_{\text{зак}}, \text{тыс. м}^3$	$Q_2, \text{тыс. м}^3$	X_2	$X_{\text{техн}}$	$C_{\text{ост}}, \text{мг/л}$	$C_1, \text{мг/л}$	$C_2, \text{мг/л}$	$C, \text{мг/л}$
бром						44246,95									
31.12.21	2587	0,312	806,94	165,22	230,05	44477,00	30603,62	2268	32871,79	0,931	0,1	178,99	982,98	927,50	1789,92
31.12.22	2587	0,303	784,25	153,56	213,81	44690,81	31142,85	2119	33261,94	0,936	0,1	173,44	950,20	900,71	1734,44
31.12.23	2587	0,294	761,55	138,49	192,84	44883,65	31671,02	1981	33651,74	0,941	0,1	168,50	923,41	878,98	1684,96
31.12.24	2587	0,286	738,79	125,06	174,13	45057,78	32190,3	1980	34169,99	0,942	0,1	164,05	901,74	859,00	1640,52
31.12.25	2587	0,277	716,09	115,02	160,15	45217,93	32701,44	1945	34646,74	0,944	0,1	159,78	881,69	841,16	1597,79
31.12.26	2587	0,268	693,39	107,71	149,97	45367,91	33207,95	1931	35139,38	0,945	0,1	155,73	863,86	824,94	1557,25
31.12.27	2587	0,259	670,70	101,01	140,65	45508,56	33710,18	1912	35622,03	0,946	0,1	151,83	847,63	810,29	1518,33
31.12.28	2587	0,250	647,94	95,21	132,57	45641,13	34209,92	1877	36087,11	0,948	0,1	148,10	833,05	797,42	1480,99
31.12.29	2587	0,242	625,24	88,07	122,62	45763,75	34703,35	1775	36477,89	0,951	0,1	144,54	820,12	787,25	1445,36
31.12.30	2587	0,233	602,54	82,02	114,20	45877,95	35192,48	1681	36873,84	0,954	0,1	141,25	809,95	779,46	1412,49
йод						44246,95									
31.12.21	47,688	0,312	14,87	165,22	230,05	44477,00	30603,62	2268	32871,79	0,931	0,1	3,16	16,71	15,77	31,58
31.12.22	47,688	0,303	14,46	153,56	213,81	44690,81	31142,85	2119	33261,94	0,936	0,1	3,06	16,19	15,35	30,65
31.12.23	47,688	0,294	14,04	138,49	192,84	44883,65	31671,02	1981	33651,74	0,941	0,1	2,98	15,77	15,02	29,81
31.12.24	47,688	0,286	13,62	125,06	174,13	45057,78	32190,3	1980	34169,99	0,942	0,1	2,91	15,44	14,71	29,06
31.12.25	47,688	0,277	13,20	115,02	160,15	45217,93	32701,44	1945	34646,74	0,944	0,1	2,83	15,13	14,44	28,33
31.12.26	47,688	0,268	12,78	107,71	149,97	45367,91	33207,95	1931	35139,38	0,945	0,1	2,76	14,86	14,19	27,64
31.12.27	47,688	0,259	12,36	101,01	140,65	45508,56	33710,18	1912	35622,03	0,946	0,1	2,70	14,61	13,97	26,98
31.12.28	47,688	0,250	11,94	95,21	132,57	45641,13	34209,92	1877	36087,11	0,948	0,1	2,63	14,39	13,78	26,34
31.12.29	47,688	0,242	11,53	88,07	122,62	45763,75	34703,35	1775	36477,89	0,951	0,1	2,57	14,20	13,63	25,72
31.12.30	47,688	0,233	11,11	82,02	114,20	45877,95	35192,48	1681	36873,84	0,954	0,1	2,52	14,05	13,53	25,16

Ефективність извлечения брома и йода по применяемой технологии принята в 90 %. Последняя величина характерна для большинства использующихся технологий извлечения брома и йода из гидроминерального сырья [6; 7; 8; 9]. В таком случае $X_{\text{техн}}$ будет равно 0,1. Для проводимых нами расчетов было принято, что ценные компоненты извлекались из всего объема закачиваемых в залежь вод.

Для оценки содержаний брома в смеси оставшихся в залежи ранее закачанных вод и сброшенного в залежь за год отработанного сырья по их химическому составу (C_2) использовалась формула А. Р. Ахундова и Ш. Ф. Мехтиева (8), а для оценки текущего содержания этого микроэлемента в попутных водах (C) – формула (13). Результаты расчета по вышеприведенному методическому подходу показывают, что на конец первого года работы йодо-бромного производства на основе попутных вод межсоловой залежи Осташковичского месторождения концентрация брома в них оценивается в 1736 мг/л (см. табл. 1).

Расписанная выше процедура при проведении расчетов за каждый год повторялась с использованием скорректированной средней величины концентраций брома, обеспеченной закачанной в залежь водой, что позволяет оценить прогнозные значения рассматриваемого показателя на начало каждого следующего года работы йодо-бромного производства. Аналогичные расчеты проведены для прогноза текущих концентраций йода в попутных водах.

Результаты проведенных расчетов, по прогнозной оценке, величины концентраций брома и йода в попутно добываемых водах межсоловой залежи Осташковичского месторождения на конец каждого года рассматриваемого периода при извлечении из них данных компонентов представлены в таблице 1.

Оценивая результаты проведенных расчетов, необходимо отметить, что за десять лет работы йодо-бромного завода, концентрации извлекаемых полезных компонентов в попутных водах межсоловой залежи Осташковичского месторождения могут снизиться примерно на 20 %. При рассмотрении более длительного периода (период функционирования завода 25–30 лет), можно полагать, что за счет разубоживания концентрации ценных компонентов могут быть снижены почти в два раза.

Используя вышеизложенный подход была проведена оценка изменения концентраций йода и бро-

ма на десятилетний период в попутно добываемых водах нефтяных залежей IV, VIII пачек межсоловых отложений и семилукско-саргаевских отложений Речицкого месторождения, межсоловых залежей Осташковичского, Ю-Осташковичского, Ю-Сосновского и III блока Березинского месторождения, воронежско-саргаевской залежи Вишанского и семилукско-саргаевской залежи Золотухинского месторождений, при их использовании в качестве гидроминерального сырья. Показано, что для большинства рассмотренных залежей нефти следует ожидать заметное снижение концентраций йода и брома за десятилетний период использования попутных вод в качестве минерального сырья. Наиболее ярко это проявляется по межсоловым залежам нефти IV пачки Речицкого месторождения, Ю-Сосновского, Осташковичского месторождений и воронежско-саргаевскому объекту разработки Вишанского месторождения. В данных залежах прогнозируется снижение концентраций ценных компонентов в попутных водах за десятилетний период функционирования йодо-бромного производства на уровне 20 % (табл. 2). Объясняется это, прежде всего, повышенными объемами закачки за этот срок отработанных (и, соответственно, обедненных бромом и йодом) вод в данные залежи по отношению к их ресурсам (35,2–63,6 %).

При использовании в качестве гидроминерального сырья попутных вод семилукско-саргаевской залежи нефти Речицкого месторождения, межсоловых залежей Южно-Осташковичского и III блока Березинского месторождения снижение концентраций этих элементов прогнозируется на уровне 4–14 %. Соотношение объема закачанных за десятилетие вод и суммарных ресурсов попутных вод в этой группе залежей более низкое и составляет 10,7–21,4 %.

На конечные концентрации брома и йода в попутных водах существенное влияние также оказывает характер изменения в процессе разработки доли пластовых рассолов в попутно добываемых с нефтью водах. Наиболее ярко это проявляется на семилукско-саргаевской залежи Золотухинского месторождения, где снижения йода и брома в попутных водах за счет разубоживания не прогнозируется. Связано это с тем, что концентрации рассматриваемых элементов в попутных водах данной залежи определяются очень высоким их содержанием в пластовых рассолах, доля которых в попутно добываемых водах велика (около 70 %), к тому же неуклонно растет.

При анализе полученных результатов расчета следует учитывать, что их достоверность будет зависеть от обоснованности средних величин концентраций рассматриваемых ценных компонентов в пластовых, закачиваемых и попутно добываемых водах. Обработка имеющихся сведений о составе этих вод указывает на то, что в настоящее время рассматриваемые величины обоснованы не в полной мере, что преимущественно связано с недостаточным качеством и небольшим количеством имеющихся фактических данных, а также неравномерностью их распределения по скважинам и, соответственно, по объемам добываемых вод. Несмотря на это, в целом с гидрогеохимических позиций результаты проведенных исследований можно считать достаточно обоснованными. На нынешнем уровне знаний результаты проведенных расчетов могут приниматься как один из наиболее реальных вариантов оценки влияния разубоживания попутных вод рассмотренных в статье залежей нефти на изменение концентраций брома и йода во время работы предприятий по их извлечению. В пользу этого свидетельствуют результаты решения этой задачи с помощью гидродинамического моделирования разработки нефтяных месторождений.

Так, сотрудниками БелНИПИнефть (С. И. Гримус) для межсоловых залежей нефти Осташковичского и Южно-Осташковичского месторождений с использованием ранее созданных и адаптированных на историю разработки ги-

дродинамических моделей проводились ретроспективные и прогнозны расчеты показателей разработки с учетом опции трассирования минерализации пластовой и закачиваемой воды. Гидродинамическая модель настраивалась с учетом имеющихся гидрохимических данных за весь период разработки объекта (плотность, минерализация пластовой и закачиваемой для ППД воды и др.). В ходе расчетов на модели определялась доля пластовых рассолов в общем объеме попутной воды за весь период разработки залежи и на десятилетний период. В прогнозных расчетах на каждом временном шаге, равном одному году, рассчитывались степень разбавления пластовой воды закачиваемой обедненной водой и соответствующее изменение концентраций брома и йода в добываемой воде на период до 2030 г. Однако, в связи с тем, что общая минерализация и плотность попутных вод нефтяных месторождений Беларуси формируются не только за счет смешения закачиваемых и пластовых вод, но и за счет рассоления продуктивных коллекторов, для этих залежей при настройке и корректировке получаемых результатов моделирования использовались специально построенные в ГГТУ им. П. О. Сухого (С. Л. Порошина) схематические карты долевого участия пластовых рассолов в попутно добываемых водах за отдельные этапы разработки залежей и карты содержания брома в попутных водах (рис. 5–7).

Таблица 2 – Сопоставление темпа снижения концентраций брома и йода в попутных водах с различными показателями

№ п/п	Месторождение, залежь	1 – X			$\Sigma Q_{\text{зак}} / \Sigma Q_{\text{в}}$	$\Delta C, \%$		$C_{\text{тек}} / C_{\text{пл}}, \%$	
		от	до	%		Br	J	Br	J
1	Осташковичское, м/с (I)	0,311	0,233	–25,1	43,0	20,3	19,6	67,1	64,3
2	Осташковичское, м/с (II)	0,311	0,233	–25,1	43,0	17,0	17,0	57,0	59,2
3	Ю-Осташковичское, м/с	0,316	0,285	–9,8	10,7	3,4	2,4	47,8	42,1
4	Золотухинское, sm-sr	0,700	0,712	+1,7	99,3	–6,8	2,9	72,3	82,2
5	Речицкое, sm-sr	0,096	0,079	–17,7	20,1	11,9	14,1	37,3	76,0
6	Речицкое, VII–IX пачки	0,298	0,351	+17,8	43,6	12,9	0,4	55,8	37,1
7	Речицкое, IV пачка	0,211	0,256	+21,3	63,6	23,5	22,0	55,8	52,3
8	Березинское, III блок	0,260	0,241	–7,3	21,4	4,0	9,0	35,2	52,5
9	Вишанское, sm-sr	0,146	0,171	+17,1	35,2	13,8	22,6	35,3	88,9
10	Ю-Сосновское, м/с	0,148	0,136	–8,1	36,1	22,0	24,7	70,7	62,2

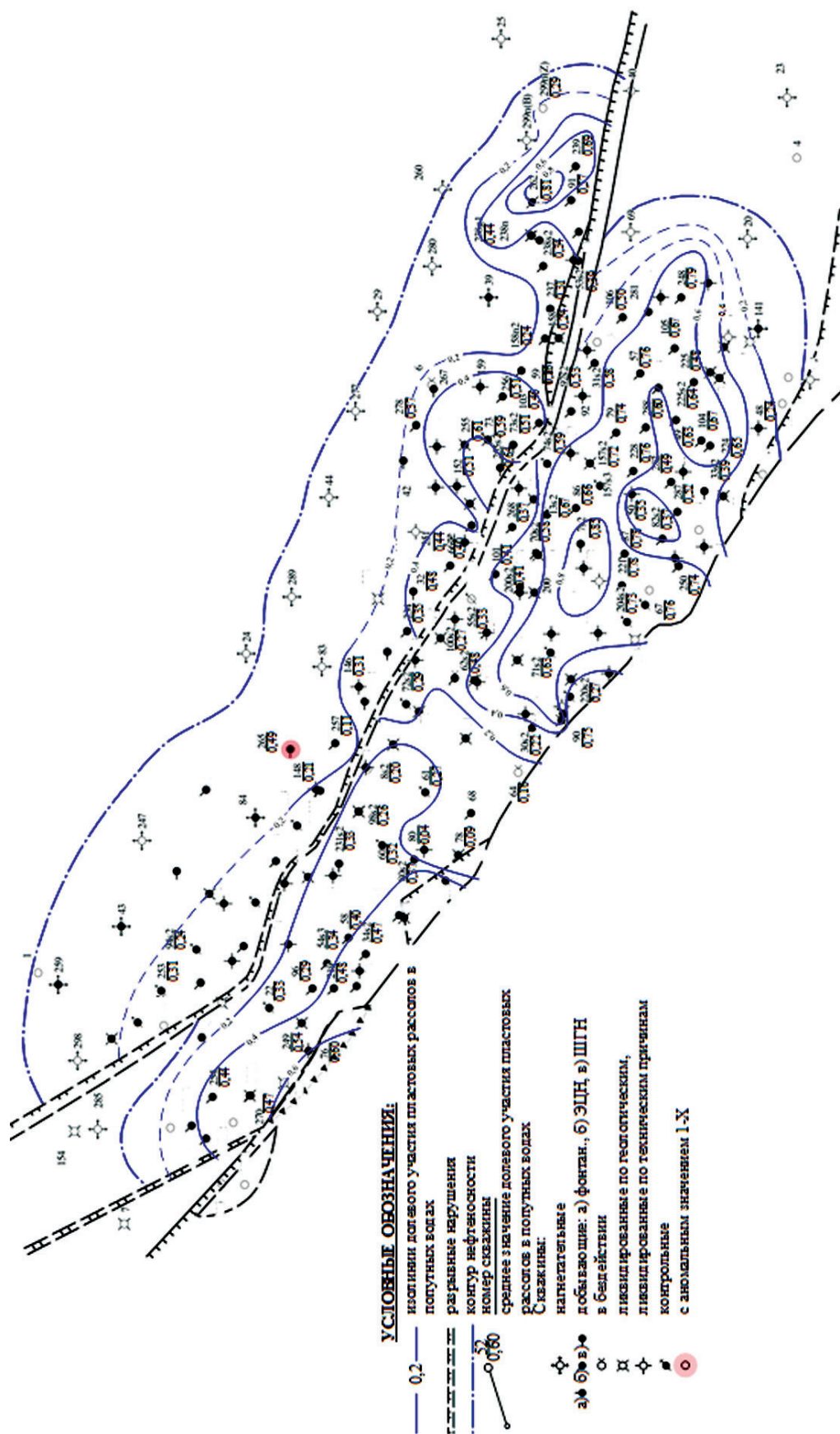


Рисунок 5 – Схематическая карта долевого участка пластовых рассолов в попутно добываемых водах петриковско-законской залежи Осташковичского месторождения (1994–2009 гг.)



Рисунок 6 – Схематическая карта долевого участка пластовых рассолов в попутно добываемых водах петриковско-зодонской залежи Осташковичского месторождения (2010–2021 гг.)

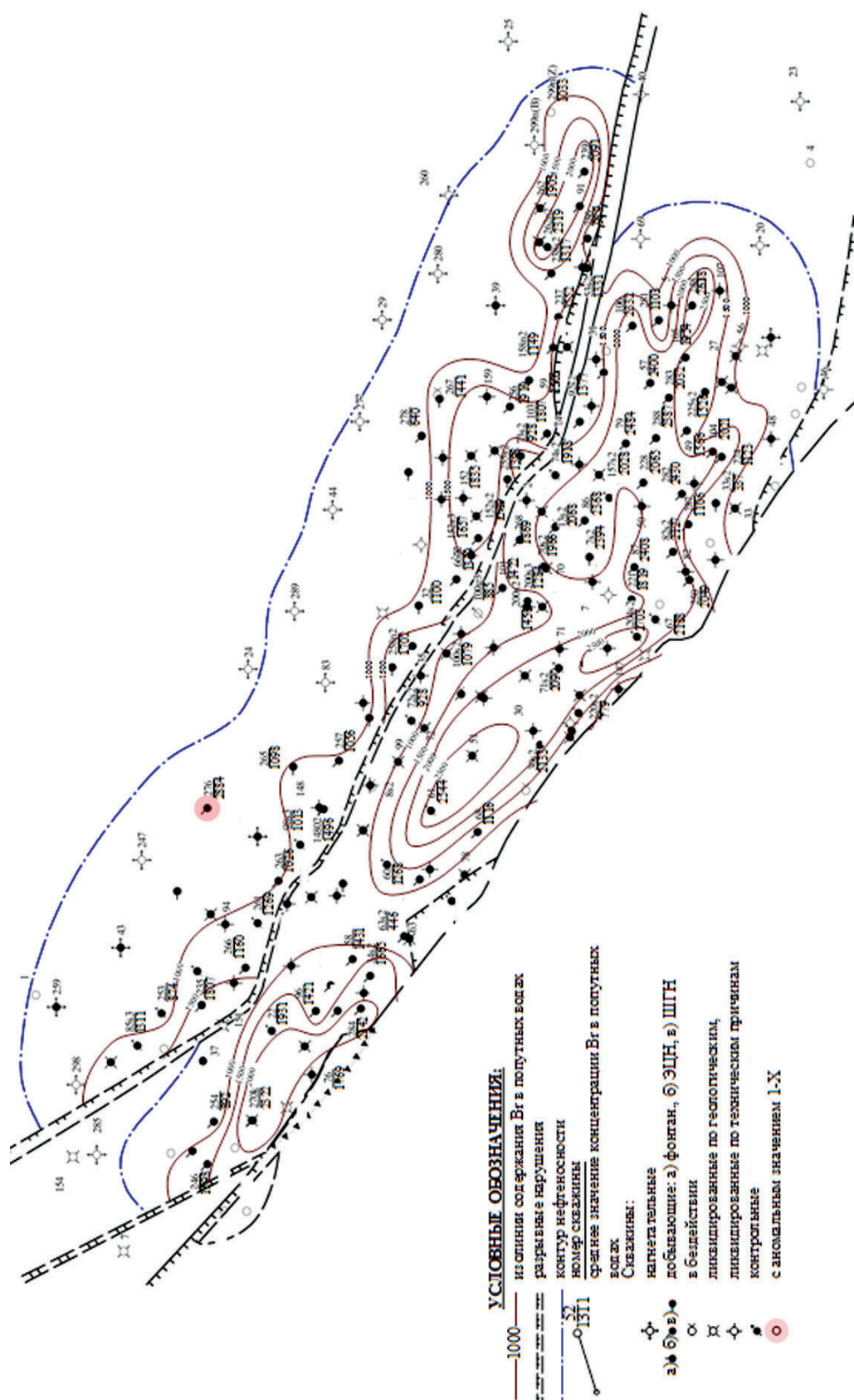


Рисунок 7 – Схематическая карта содержания брома в попутно добываемых водах петриковско-задонской залежи Осташковического месторождения

Полученные результаты моделирования показывают, что за десять лет закачки обедненной воды в межсолевую залежь Осташковичского месторождения степень разбавления попутной воды ею может составить 19 %. За счет этого за десять лет разработки концентрация брома в попутной воде может снизиться до 1460,38 мг/л, а концентрация йода – до 25,7 мг/л. В попутной воде межсолевой залежи Южно-Осташковичского месторождения ожидается снижение концентраций рассматриваемых микрокомпонентов на 5 % от текущих значений. Расхождение результатов моделирования с гидрохимическими расчетами для обеих залежей составило менее 1 % [5]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые результаты по проблеме прогнозной оценки изменения концентраций полезных компонентов в попутных водах нефтяных месторождений Беларуси при их использовании для извлечения йода и брома, позволяющие сделать следующие выводы:

1. Одна из наиболее сложных задач оценки изменения ресурсной базы промышленно ценных элементов при использовании попутных вод нефтяных месторождений Беларуси в качестве гидроминерального сырья связана с учетом процесса их разубоживания при закачке в продуктивные пласты добытых вод после извлечения из них конкретных компонентов. Связано это, прежде всего, с необходимостью учета интенсивно проявляющихся процессов взаимодействия закачиваемых для ППД вод с засоленными продуктивными породами, а также с периодически проводимыми подливами пресных вод в добывающие скважины для предупреждения и борьбы с отложениями хлоридных солей, оказывающими существенное влияние на формирование химического состава попутных вод.

2. Впервые для условий нефтяных месторождений Республики Беларусь разработан и апробирован гидрохимический способ оценки изменения концентраций ценных компонентов в попутных водах в процессе их использования в качестве гидроминерального сырья. Предлагаемый гидрогеохимический подход основан на прогнозе изменения концентраций йода и брома в попутно добываемых с нефтью водах за счет устанавливаемого для конкретных залежей долевого участия пластовых рассолов и разбавления ранее закачанных в залежь вод

отработанными (после извлечения ценных компонентов) водами.

3. Проведенная оценка изменения концентраций йода и брома в попутно добываемых водах ряда наиболее крупных нефтяных залежей показала, что для большинства из них следует ожидать заметное (4–25 %) снижение концентраций йода и брома за десятилетний период использования попутных вод в качестве минерального сырья. За планируемый срок работы йодо-бромного завода (25–30 лет) концентрации этих компонентов в попутных водах на ряде залежей могут снизиться в 2 и более раза.

4. В связи с тем, что общая минерализация и плотность попутных вод нефтяных месторождений Беларуси, используемые в модельных расчетах, формируются не только за счет смешения закачиваемых и пластовых вод, но и за счет рассоления продуктивных коллекторов, а также проводимых технологических обработок скважин пресной водой, использование ранее созданных и адаптированных на историю разработки гидродинамических моделей для решения стоящей задачи должно осуществляться с настройкой и корректировкой получаемых результатов моделирования по материалам детальным гидрохимическим исследованиям.

5. Сравнение результатов параллельно проводимого прогноза изменения концентрации йода и брома при использовании попутных вод межсолевых залежей Осташковичского и Южно-Осташковичского месторождений в качестве гидроминерального сырья за десятилетний период показало, что расхождение результатов моделирования с гидрохимическими расчетами для обеих залежей составило менее 1 %. Это может быть свидетельством достаточно высокой эффективности предложенного и апробированного в работе гидрохимического метода решения рассматриваемой задачи.

6. На нынешнем уровне знаний результаты проведенных расчетов по предложенной авторами гидрохимической методике могут приниматься как один из наиболее реальных вариантов оценки влияния разубоживания попутных вод рассмотренных в статье залежей нефти на изменение концентраций брома и йода во время работы предприятия по их извлечению. Результаты проведенных исследований рекомендуется использовать при рассмотрении вопроса организации производства по получению йода, брома, а также других промышленно-ценных элементов и их соединений из попутных вод нефтяных месторождений Беларуси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савченко, А. Ф.** Состояние и проблемы освоения попутных вод нефтяных месторождений ПО «Белоруснефть» в качестве гидроминерального сырья / А. Ф. Савченко, И. А. Стрешинский, В. Д. Порошин // Стратегия развития нефтедобывающей промышленности Республики Беларусь на 2000–2015 гг. : материалы науч.-практ. конф. (14–17 сентября 1999 г.). – Гомель : ПО «Белоруснефть», 1999. – С. 402–409.
2. **Порошин, В. Д.** Оценка запасов и ресурсов промышленно-ценных компонентов в попутных водах нефтяных месторождений Беларуси / В. Д. Порошин, Н. В. Хайнак, Н. В. Хайнак // Стратегия развития нефтедобывающей промышленности Республики Беларусь на 2000–2015 гг. : материалы науч.-практ. конф. (14–17 сентября 1999 г.). – Гомель : ПО «Белоруснефть», 1999. – С. 410–415.
3. **Порошин, В. Д.** Попутные воды нефтяных месторождений Беларуси – нетрадиционный источник минерального сырья / В. Д. Порошин, Н. В. Хайнак // Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь : сб. науч. тр. – Вып. 4. – Гомель : БелНИПИнефть, 2001. – С. 152–156.
4. **Жогло, В. Г.** О комплексном использовании геотермальных и гидроминеральных ресурсов нефтяных месторождений Беларуси, находящихся на поздней стадии разработки / В. Г. Жогло, Н. А. Демяненко, А. А. Махнач // Нефть. Газ. Новации. – 2013. – № 1. – С. 76–80.
5. **Порошин, В. Д.** Оценка запасов и ресурсов промышленно-ценных компонентов в попутных водах нефтяных месторождений Беларуси / В. Д. Порошин, А. Г. Ракутько, С. И. Гримус // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 196–199.
6. **Йовчев, Р. И.** Методические рекомендации по изучению и оценке попутных вод месторождений полезных ископаемых в целях их использования в качестве гидроминерального сырья / Р. И. Йовчев [и др.]. – М. : ВСЕГИНГЕО, 1985. – 97 с.
7. **Ефремочкин, Н. Е.** Временные рекомендации по обоснованию запасов попутных вод нефтяных месторождений в качестве гидроминерального сырья / Н. Е. Ефремочкин, Р. И. Йовчев, А. А. Бездетный – М. : ВСЕГИНГЕО, 1987. – 70 с.
8. **Ефремочкин, Н. В.** Подсчет эксплуатационных запасов попутных вод нефтяных месторождений / Н. В. Ефремочкин // Разведка и охрана недр. – 1986. – № 6. – С. 42–45.
9. **Бондаренко, С. С.** Геолого-экономическая оценка месторождений подземных промышленных вод / С. С. Бондаренко, Л. А. Лубенский, Г. В. Куликов. – М. : Недра, 1988. – 201 с.
10. **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.
11. **Порошина, С. Л.** Новые подходы к оценке масштабов рассоления коллекторов нефтяных месторождений Беларуси по промысловым гидрохимическим данным / С. Л. Порошина // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2019. – № 4. – С. 3–12.
12. **Порошин, В. Д.** Оценка масштабов рассоления продуктивных пород нефтяных месторождений Припятского прогиба по промысловым гидрохимическим данным (на примере Северо-Домановичского месторождения) / В. Д. Порошин, С. Л. Порошина // Літасфера. – 2020. – №1 (52). – С. 148–160.
13. **Порошина, С. Л.** К вопросу представительности данных о химическом составе попутных вод нефтяных месторождений Беларуси и методических приемах их обработки (интерпретации) / С. Л. Порошина // Літасфера. – 2021. – № 1 (54). – С. 58–70.
14. **Мехтиев, Ш. Ф.** Практические вопросы нефтепромысловой гидрогеологии / Ш. Ф. Мехтиев, А. Р. Ахундов, Е. А. Ворошилов. – Баку : ЭЛМ, 1975. – 188 с.
15. **Кудельский, А. В.** Гидрогеология и рассолы Припятского нефтегазоносного бассейна / А. В. Кудельский, В. М. Шиманович, А. А. Махнач. – Минск : Наука и техника, 1985. – 223 с.
16. **Порошин, В. Д.** К вопросу оценки представительности гидрохимических данных (на примере Припятского прогиба) / В. Д. Порошин, В. П. Хайнак, А. Г. Морозов // Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь : сб. науч. тр. – Гомель : БелНИПИнефть, 1995. – Вып. 2. – С. 57.
17. **Порошин, В. Д.** Оценка представительности данных по химическому составу пластовых вод нефтегазоносных бассейнов / В. Д. Порошин // Геохимия. – 1998. – № 6. – С. 615–628.
18. **Порошин, В. Д.** К методике определения природы вод при проведении солянокислотных обработок в скважинах / В. Д. Порошин, В. В. Муляк, Е. А. Пинчук // Літасфера. – 2005. – № 2 (23). – С. 151–153.

Артыкул паступіў у рэдакцыю 17.03.2023

Рэцэнзент В. Г. Жогла

ПРАГНОЗ ЗМЯНЕННЯ КАНЦЭНТРАЦЫЙ ЁДУ І БРОМУ Ў СПАДАРОЖНЫХ ВОДАХ НАФТАВЫХ РАДОВІШЧАЎ БЕЛАРУСІ ПРЫ ІХ ВЫКАРЫСТАННІ Ў ЯКАСЦІ ГІДРАМІНЭРАЛЬнай СЫРАВІНЫ

В. Дз. Парошын, С. Л. Парошына

УА «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт імя П. В. Сухого»
проспект Кастрычніка, 48, 246746, Гомель, Беларусь
E-mail: poroshin-52@mail.ru

Упершыню для ўмоў нафтовых радовішч Рэспублікі Беларусь распрацаваны гідрахімічны метады ацэнкі разбавлення спадарожных вод у працэсе іх выкарыстання ў якасці гідрамінеральнай сыравіны. Метад заснаваны на прагнозе змены канцэнтрацый прамыслова каштоўных хімічных элементаў, якія адначасна здабываюцца з нафтай у водах за кошт змены разлічваемага для канкрэтных пакладаў долявага ўдзелу пластовых расолаў у завадненні прадуктыўных пластоў і за кошт разваднення раней запампаваных у паклад вод адпрацаванымі (пасля вымання каштоўных кампанентаў) вод. Апрацаваны прапанаванага метаду разглядаецца на прыкладзе прагнозу на дзесяцігадовы перыяд (2021–2030 гг.) змянення зместу ёду і броду ў спадарожных водах самага буйнога ў Беларусі міжсолевага пакладу нафты Асташкавіцкага радовішча пры выманні з іх гэтых элементаў і запампоўцы адпрацаваных вод у нагнятальныя свідравіны.

PROGNOSIS OF CHANGES OF IODINE AND BROMINE CONCENTRATIONS IN THE ASSOCIATED WATER OF BELARUSIAN OIL FIELDS WHEN USING IT AS HYDROMINERAL RAW MATERIAL

V. D. Poroshin, S. L. Poroshina

UO «Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi»
48 Oktyabrya Avenue, 246746, Gomel, Belarus
E-mail: poroshin-52@mail.ru

For the first time, a hydrochemical method for assessing the dilution of associated water when using it as hydromineral raw material has been developed for the Belarusian oil fields. The method is based on the prognosis of changes in the concentrations of the industrially valuable chemical elements in the water extracted with oil due to changes in participating stake of formation brines calculated for certain deposits during the flooding of productive layers and due to dilution of water, previously injected into the reservoir, with return water. The approbation of the proposed method is considered on the example of the largest inter-salt oil deposit of the Ostashkovichi field in Belarus. The article supplies a prognosis for a ten-year period (2021–2030 y.) of changes of the iodine and bromine contents in associated water during the extraction of these elements and injection of return water back into injection wells.