

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСТРУКЦИИ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В АЗОВСКОМ МОРЕ

В работе предлагается математическая модель процесса деструкции нефтяного загрязнения с учетом конвективного переноса, диффузии, испарения, растворения, эмульгирования, диспергирования, агрегирования, микробиологического разложения, седиментации, как наиболее характерных для трансформации нефти в Азовском море.

Ключевые слова: математическое моделирование, деструкция, нефтяное загрязнение, конвективный перенос, диффузия, микробиологическое разложение.

С нефтяными углеводородами, попавшими в море, происходят различные физические, химические и биологические процессы рассеяния и трансформации, вплоть до их полного исчезновения как исходных субстратов, важнейшими из которых являются: конвективный перенос, диффузия, испарение, растворение, эмульгирование, диспергирование, агрегирование, микробиологическое разложение, седиментация, химическое окисление и деструкция.

В работе анализируются особенности загрязнения Азовского моря нефтяными углеводородами, и предлагается математическая модель с учетом этих особенностей, а также процессов деструкции загрязнения, включая испарение, естественную и искусственную биодеструкцию и др. методов борьбы с нефтяными загрязнениями.

Попав в воду, нефть образует на поверхности пленку разной толщины. Под действием ветра и волнения воды нефть разбивается на мелкие, разных размеров глобулы. Эти глобулы расположены, в основном в поверхностном слое воды, причем на глубине 50 см одна глобула встречается в объеме 81 м³ воды. Совокупность (группа) глобул и образует поверхностное нефтяное пятно. С увеличением глубины количество глобул резко уменьшается.

Нефть – это сложная смесь несколько тысяч углеводородов, нафтеновых кислот, асфальтенов, смол и других компонентов. Классификацию компонент нефти можно осуществлять по разным признакам.

С точки зрения деструкции, нефть можно разделять на разные фракции в зависимости от рассматриваемого процесса. При исследовании процесса испарения, нефть можно разбить на летучую, испаряемую и неиспаряемые фракции, причем в первую фракцию нужно включать легкие ароматические соединения, а в третью – тяжелые компоненты. При исследовании процесса естественной биодеструкции нужно учесть, что гетеротрофные и использующие

нефть бактерии концентрируются на глобулах, причем их общая численность на поверхности одной глобулы средних размеров может составлять до 10⁶. Опытным путем определено, что в зависимости от сорта нефти

микрорганизмы разлагают до 2 г нефти на 1 м² поверхности моря за сутки (Дембицкий и др., 2003; Доценко и др., 1995 г). Кроме того, поскольку легкие ароматические соединения ядовиты, то процесс биодеструкции нефти начинается после их испарения, причем оставшуюся часть нефтяных углеводородов можно разбить также на ряд фракций, например, на три фракции, включив в первую фракцию компоненты, лучше всего поддающиеся, а в третью – не поддающиеся биодеструкции. Например, многоатомные ароматические соединения и циклические алканы плохо поддаются микробному разложению.

Азовское море имеет ряд особенностей, оказывающих существенными при исследовании загрязнения моря нефтяными углеводородами:

- 1) Малые размеры. Нефтяное загрязнение, в какой бы части моря оно не произошло, достаточно быстро может достичь берега, большей частью представляющего собой песчаные пляжи с большую рекреационную ценность;
- 2) Мелководность, из-за которой даже при небольшом ветре развивается значительное волнение, практически полностью перемешивающее воды моря и насыщающее их кислородом.

С другой стороны, при полном штиле, который иногда случается летом на море при высокой температуре, возникает мор и массовая гибель рыб и микроорганизмов из-за отсутствия кислорода;

- 3) Высокая биологическая продуктивность моря, обладающего уникальным сочетанием условий для развития и размножения мальков ценных пород рыбы. Как известно, именно они в первую очередь погибают от нефтяного загрязнения моря.

- 4) Большое количество взвесей, выносимых в море в основном реками Дон и Кубань.

При математическом моделировании загрязнения Азовского моря нефтяными углеводородами, в соответствии с этими особенностями, необходимо учесть, что нефть существует в водной среде, как было указано выше, в виде следующих агрегатных состояний: 1) Поверхностных пленок (сликов); 2) Ра-

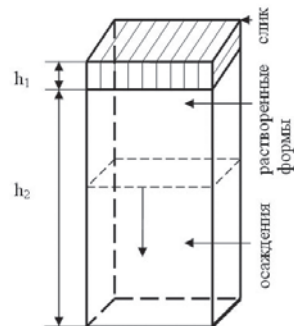


Рис. 2. К выводу двухмерной модели трехмерного загрязнения.

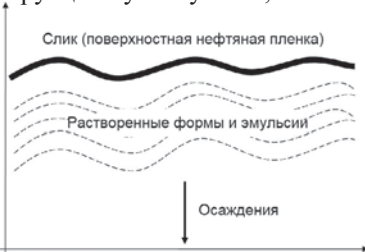


Рис. 1. Вертикальный разрез нефтяного загрязнения водной среды.

створимых форм и эмульсий типа «нефть в воде» и «вода в нефти», образование которых существенно зависит от ветровых и волновых условий; 3) Мазутно-нефтяные образования, сорбированные на взвешах нефтяные фракции.

Нефтяное загрязнение водной среды имеет трехмерный характер с существенным превышением поверхностного загрязнения (Рис. 1). Использование трехмерных математических моделей наталкивается на ряд вычислительных трудностей, и поэтому возникает проблема составления двумерных моделей трехмерных нефтяных загрязнений. Ниже предлагается один из вариантов решения этой проблемы, а именно, в работе предлагается двумерная математическая модель динамики нефтяного загрязнения Азовского моря с учетом процессов, наиболее существенных для его условий: конвективного переноса, диффузии, испарения, микробиологического разложения и седиментации. Растворение, эмульгирование и диспергирование учитываются косвенно.

Перейдем к формулировке этой двумерной математической модели трехмерного загрязнения. Выберем произвольный малый прямоугольный столп воды (Рис. 2) с объемом, с площадью основания S (на дне и на поверхности воды) и высотой H . Толщина слоя h_1 достаточно мала ($1 - 0,1$ мм) по сравнению с h_2 . Введем двумерную систему координат на поверхности моря, причем (x, y) координаты центра верхнего основания прямоугольного столба воды. Обозначим через $C_1(t, x, y)$ поверхностную концентрацию загрязнения в момент времени t , т.е. отношение массы нефти, содержащейся в выделенной на рис.2 части слоя к S .

Вычислим массу всей нефти в прямоугольном столбе воды моря, за исключением массы нефти в слое, осаждающейся на дно нефти, и через $C_2(t, x, y)$ обозначим отношение этой массы к площади S . Т.о., $C_2(t, x, y)$ представляет собой усредненную суммарную поверхностную концентрацию растворимых и эмульсионных форм нефти в глубине водной среды, соотношенную к точке поверхности моря.

Обозначим через $C_3(t, x, y)$ отношение массы осаждающейся на дно нефти к площади S . $C_3(t, x, y)$ представляет собой усредненную суммарную поверхностную концентрацию осаждающейся на дно нефти, соотношенную к точке поверхности моря.

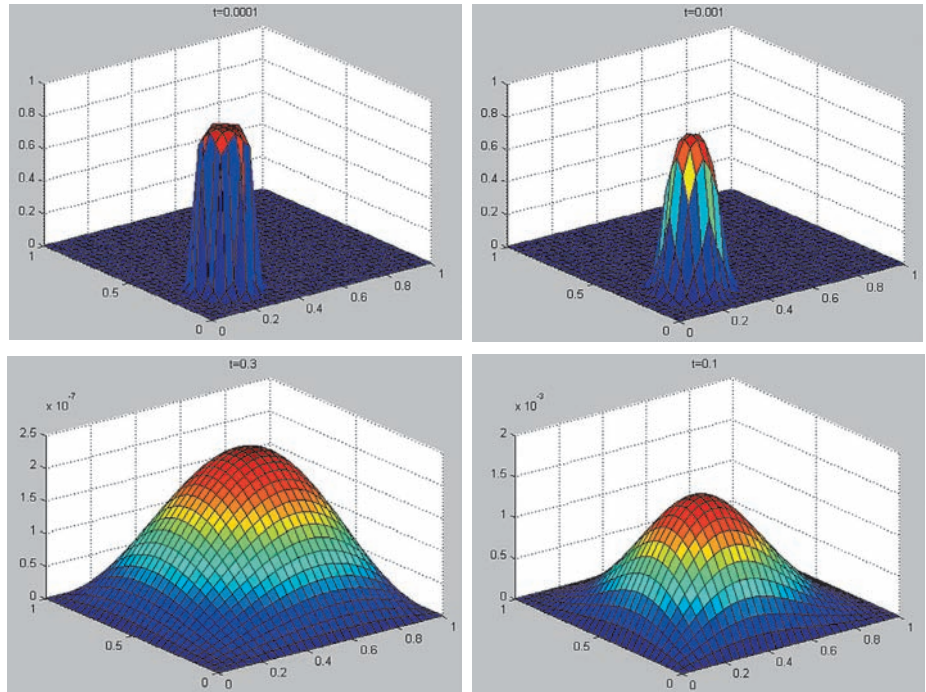


Рис. 3. Изменение концентрации нефти N_1 с течением времени. а) $t=0.0001$, б) $t=0.001$, в) $t=0.1$, макс. значение N_1 равно 0.002, г) $t=0.3$ макс. значение N_1 равно 0.0000026.

Рассмотрим, как можно найти объемную концентрацию нефти в момент t в произвольной точке (z, x, y) , где z – глубина, если известны $C_1(t, x, y)$, $C_2(t, x, y)$ и $C_3(t, x, y)$. Объемная концентрация будет кусочно-постоянной функцией глубины, в соответствии со схемой перехода (Рис. 2) и имеющей постоянные значения для слоя, около дна и в остальном пространстве. Нужно выделить «соответствующий» прямоугольный параллелепипед с площадью основания S_1 и с объемом V_1 , «соответствующую» концентрацию нефти, а именно $C_1(t, x, y)$, $C_2(t, x, y)$ или $C_3(t, x, y)$, умножить на S_1 и поделить на V_1 . Для упрощения математического моделирования, считаем, что имеется только два вида нефтеокисляющих микроорганизмов, способных преимущественно разлагать нефтяное загрязнение: на поверхности и в глубине водной среды, соответственно.

Обозначим через $B_1(t, x, y)$ – поверхностную концентрацию микроорганизмов, т.е. отношение массы микроорганизмов, содержащейся в выделенной на рис. 2 части слоя к площади S .

Вычислим массу микроорганизмов в прямоугольном столбе воды моря, за исключением массы микроорганизмов в слое и через $B_2(t, x, y)$ обозначим отношение этой массы к площади S . Таким образом, $B_2(t, x, y)$ представляет собой суммарную концентрацию микроорганизмов в глубине моря, соотношенную к точке (x, y) поверхности моря. Объемную концентрацию микроорганизмов можно найти аналогично объемной концентрации нефти, как

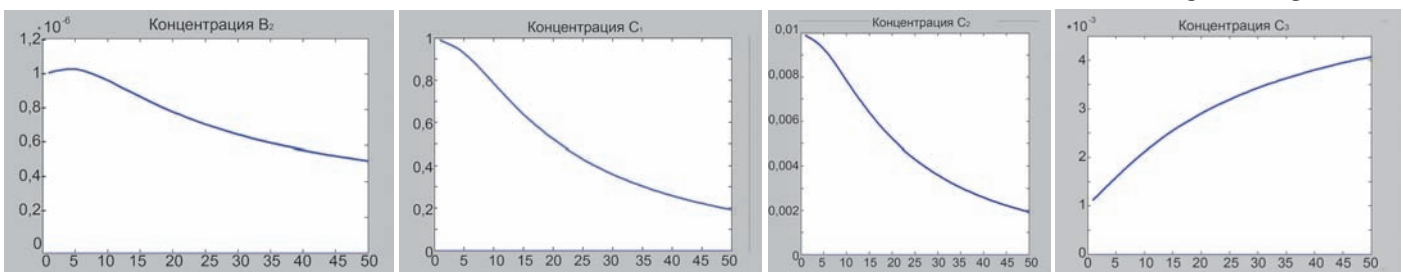


Рис. 4. Изменение концентрации нефти (а, б, в) и нефтеокисляющих микроорганизмов (г) в центре нефтяного загрязнения с течением времени.

это было показано выше.

Для математического моделирования процесса микробной деструкции нефти, попавшей в море, сделаем следующие предположения:

1) Процессы испарения, растворения, биологического окисления происходят независимо друг от друга, т.е. взаимным влиянием этих процессов мы пренебрегаем. Такой подход широко распространен.

2) Процесс микробного окисления происходит в широком температурном диапазоне, т.к. большинство нефтеокисляющих микроорганизмов жизнеспособно и при высокой температуре (порядка 30 – 70°C), и при очень низкой температуре (порядка -10 – 0°C). При граничных высоких и низких температурах в зависимости от вида, некоторые микроорганизмы проявляют повышенную активность, но мы этим фактом пренебрегаем. Существуют различные зависимости скорости роста $l(T(t))$ и отмирания $m(T(t))$ и коэффициента насыщения $k_s(T(t))$ популяции нефтеокисляющих микроорганизмов от температуры (Дембицкий и др., 2003), т.е. различные функции $l(T(t))$, $m(T(t))$, $k_s(T(t))$. В данной работе эти функции используются с учетом специфики района нефтяного загрязнения, вида нефтеокисляющих микроорганизмов, а также условий внесения биопрепаратов.

3) Скорость роста популяции нефтеокисляющего микробного населения пропорциональна ее численности. В работе моделирование изменения численности популяции нефтеокисляющего микробного населения будем проводить на основе одного из фундаментальных предположений, лежащих в основе всех моделей роста популяции: скорость роста популяции пропорциональна ее численности, математически этот закон записывается с помощью уравнения Мальтуса:

$$\partial B / \partial t = FB, \quad (1)$$

где B – численность бактериального населения, t – время, F в общем случае может быть функцией, как самой численности, так и времени и зависеть от других внешних и внутренних факторов.

4) Очевидно, что если коэффициент пропорциональности в (1) является постоянной, т.е. $F = \text{const}$, то численность бактериального населения будет расти неограниченно по экспоненциальному закону. Это возможно при отсутствии каких-либо ограничений на скорость изменения численности популяции. В условиях лимитирования по субстрату скорость изменения численности популяции растет пропорционально концентрации субстрата, т.к. из множества необходимых для жизнедеятельности пищевых компонентов, субстратов, потребляемых организмами исследуемой популяции, субстрат, находящийся в наименьшей доступности и лимитирующий ростовые процессы, определяет скорость размножения. Этот принцип известен как принцип минимума Либиха. Причиной ограничения роста популяции нефтеокисляющих бактерий в данной работе предполагается лимитирование по количеству доступной для бактерий нефти. В некоторых случаях нужно учесть лимитирование по количеству доступного кислорода, фосфора и т.д.

5) Убыль нефтепродукта пропорциональна численности нефтеокисляющих микроорганизмов, т.к. из микробиологических исследований известно, что в условиях лимитирования по субстрату скорость изменения численности популяции растет пропорционально концентрации субстрата, а при избытке субстрата выходит на постоянную величину. В течение некоторого времени численность популяции растет экспоненциально, пока скорость роста не начинает лимитироваться какими-либо другими факторами. Зависимость скорости роста F в уравнении Мальтуса от количества субстрата может быть описана уравнением Моно (2):

$$F(C) = \frac{\mu_m(T(t))C}{C + K_s(T(t))}, \quad (2)$$

где μ_m – максимальная возможная скорость роста бактерий при избытке субстрата, C – концентрация субстрата (нефтепродукта), K_s – коэффициент насыщения, имеющий размерность, аналогичную размерности субстрата.

6) Различные виды микробных сообществ обладают своими свойствами, подчиняются своим законам взаимодействия. Кроме того, современная микробиология нефтеокисляющих микроорганизмов все время развивается, и выпускаются новые биопрепараты в том числе, биоконплексы, содержащие комплексы простейших микроорганизмов. В данной работе биопрепараты, в состав которых входят микроорганизмы со сложной организацией не рассматриваются, поскольку для определения основных закономерностей процесса биологической деструкции и грубой оценки нужного количества биопрепарата, на начальном этапе исследования необходимо использовать наиболее простую модель, отражающую основные свойства, характерные для всех видов микробных сообществ.

Таким образом, для описания динамики популяции нефтеокисляющих микроорганизмов будем использовать уравнения Мальтуса и (2) с учетом их отмирания:

$$\frac{\partial B}{\partial t} \sim \frac{\mu_m(T(t))C}{C + K_s(T(t))} B - \lambda(T(t)) B, \quad (3)$$

где $\lambda(T(t))$ – скорость отмирания клеток. Из (3) следует, что рост микробной популяции в единицу времени пропорционален величине концентрации нефти и зависит от количества лимитирующего субстрата, а убыль популяции происходит за счет естественной смертности микроорганизмов.

Для описания взаимосвязи изменения концентрации нефти и изменения численности нефтеокисляющих микроорганизмов будем исходить из того, что убыль нефтепродукта пропорциональна численности микроорганизмов. Отсюда, концентрация нефти C изменяется во времени и зависит от численности микроорганизмов B по закону:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \sim \frac{\mu_m(T(t))C}{C + k_s(T(t))} B. \quad (4)$$

С учетом сделанных выше предположений, а также принимая во внимание уравнения (2), (3) и (4), получим следующую систему уравнений, описывающую изменение численности популяции нефтеокисляющих микроорганизмов при условии ограниченности по субстрату, конвективного переноса и диффузии нефтяного загрязнения с учетом изменения концентрации нефти при микробном окислении.

Система уравнений для искомых функций имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial C_1}{\partial t} + U_{11} \frac{\partial C_1}{\partial x} + V_{12} \frac{\partial C_1}{\partial y} = K_{11} \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} + K_{12} \frac{\partial^2 C_1}{\partial y^2} - \\
 & - \alpha_1(t, x, y) C_1 - \frac{\mu_1(T(t)) C_1 B_1}{C_1 + k_1(T(t))} + f_1(t, x, y) \\
 & \frac{\partial C_2}{\partial t} + U_{21} \frac{\partial C_2}{\partial x} + V_{22} \frac{\partial C_2}{\partial y} = K_{21} \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} + K_{22} \frac{\partial^2 C_2}{\partial y^2} - \\
 & - \alpha_2(t, x, y) C_2 - \frac{\mu_2(T(t)) C_2 B_1}{C_2 + k_2(T(t))} + f_2(t, x, y) \\
 & \frac{\partial C_3}{\partial t} = \alpha_3(t, x, y, C_3) C_2 \\
 & \frac{\partial B_1}{\partial t} + U_{11} \frac{\partial B_1}{\partial x} + V_{12} \frac{\partial B_1}{\partial y} = K_{11} \frac{\partial^2 B_1}{\partial x^2} + K_{12} \frac{\partial^2 B_1}{\partial y^2} + \delta_{11} \frac{\partial C_1}{\partial x} \frac{\partial B_1}{\partial x} + \\
 & + \delta_{12} \frac{\partial C_1}{\partial y} \frac{\partial B_1}{\partial y} + \left(\frac{d_{11} \mu_1(T(t)) C_1}{C_1 + k_1(T(t))} + \frac{d_{12} \mu_2(T(t)) C_2}{C_2 + k_2(T(t))} - \lambda_1(T(t)) \right) B_1 = 0 \\
 & \frac{\partial B_2}{\partial t} + U_{21} \frac{\partial B_2}{\partial x} + V_{22} \frac{\partial B_2}{\partial y} = K_{21} \frac{\partial^2 B_2}{\partial x^2} + K_{22} \frac{\partial^2 B_2}{\partial y^2} + \delta_{21} \frac{\partial C_2}{\partial x} \frac{\partial B_2}{\partial x} + \\
 & + \delta_{22} \frac{\partial C_2}{\partial y} \frac{\partial B_2}{\partial y} + \left(\frac{d_{21} \mu_1(T(t)) C_1}{C_1 + k_1(T(t))} + \frac{d_{22} \mu_2(T(t)) C_2}{C_2 + k_2(T(t))} - \right. \\
 & \left. - \lambda_2(T(t)) \right) B_2 = 0. \tag{5}
 \end{aligned}$$

В уравнениях $(U_{ij}, V_{ij}), (U_{2i}, V_{2i})$ – компоненты вектора скорости поверхностного и глубинного течений, удовлетворяющие уравнению неразрывности, (K_{ij}, K_{ij}) – коэффициенты турбулентной диффузии на границе раздела фаз воздух/вода, K_{2j}, K_{2j} – коэффициенты диффузии нефти в водной среде; $\lambda_j(T(t))$ – скорости естественного отмирания j -того вида нефтеокисляющих микроорганизмов; $\mu_j(T(t))$ – максимальная скорость роста j -того вида нефтеокисляющих микроорганизмов при деструкции i -той фракции; $k_j(T(t))$ – коэффициент насыщения j -того вида микроорганизмов, имеющий ту же размерность, что и субстрат, l_{ij} – коэффициент пропорциональности количества бактерий j -того вида и поглощенного субстрата для i -той фракции.

В отсутствии других механизмов изменения, количество микроорганизмов увеличивается максимально при движении в направлении увеличения пищи, т.е. вдоль градиента C_i , и при этом скорость их увеличения пропорциональна их количеству, следовательно, количество микроорганизмов увеличивается максимально при движении в направлении градиента M_j , таким образом:

$$\frac{\partial B_j}{\partial t} \sim (\text{grad } C_i, \text{grad } B_j).$$

При построении конкретных моделей и сценариев развития нефтяного загрязнения к этим уравнениям добавляются краевые условия. Эти условия определяют конкретную математическую модель и зависят, например, от методов борьбы с нефтяными загрязнениями, от способов использования биопрепаратов и т.д. Рассмотрим некоторые из этих случаев. Пусть $U \subset E^2$ – некоторая прямоуголь-

ная область, включающая исследуемую часть моря с прилегающей сушей (берегом), $D \subset U$ – область нефтяного пятна, меняющаяся со временем, граница области определяется условием $C_1(t, x, y) |_{(x,y) \in D} = C_{nck}, t \geq 0$. В зависимости от объема нефтяного загрязнения, условий окружающей среды, используемых методов сбора нефти на начальной стадии борьбы с нефтяным загрязнением, форма нефтяных пятен бывает различной. В данном случае будем рассматривать простейший случай, когда область нефтяного загрязнения D представляет собой односвязную область.

Предполагаем, что в начальный момент времени t распределение концентрации и нефтеокисляющих микроорганизмов известны и задаются функциями $C_{i0}(x, y), B_{i0}(x, y)$:

$$\begin{aligned}
 C_i(t, x, y) |_{t=0} &= \begin{cases} C_{i0}(x, y), & (x, y) \in D \\ 0, & (x, y) \in U \setminus D \end{cases} \\
 B_i(t, x, y) |_{t=0} &= \begin{cases} B_{i0}(x, y), & (x, y) \in D \\ 0, & (x, y) \in U \setminus D \end{cases}. \tag{6}
 \end{aligned}$$

Выбирая функцию $B_{i0}(x, y)$, можно исследовать естественную или искусственную биодеструкцию, учесть разные способы внесения биопрепаратов.

Рассмотрим различные граничные условия.

1) Нефтяное загрязнение находится достаточно далеко от берега, так что, например, используя биологические препараты, удастся ликвидировать нефтяное загрязнение до того, как оно приблизится к берегу, тогда влиянием берега можно пренебречь. В этом случае для системы уравнений (5) – (6) ставятся только начальные условия, и получаем для определения искомым функций задачу Коши.

2) Предположим, что нефтяное загрязнение удерживается боновыми заграждениями, причем протечками нефти за пределами боновых заграждений можно пренебречь, тогда ставятся следующие граничные условия

$$C_i |_{(x,y) \in \partial U} = 0, B_i |_{(x,y) \in \partial U} = 0,$$

где ∂U – линия боновых заграждений. Эти граничные условия вместе с начальными условиями и системой уравнений задают краевую задачу для определения искомым функций. Заметим, что при этом конвективным переносом можно пренебречь.

3) Если пятно расположено достаточно близко к берегу и возможен выброс на берег, то постановка граничных условий, связанных с берегом, зависит от физико-химических свойств нефти и морфологической структуры побережья.

Для численного решения краевой задачи использовались явная и неявная разностные схемы. В последнем случае для решения полученных нелинейных разностных уравнений использовался специальный метод последовательных приближений.

Было проведено большое количество вычислительных экспериментов, которые позволили выявить ряд основных закономерностей деструкции нефтяного загрязнения с учетом выявленных выше особенностей Азовского моря.

Предположим, что разлилось небольшое количество нефти и образовалось нефтяное пятно. Как показано на рис. 3, пятно переносится по течению и одновременно за счет диффузии, испарения, выпадения в осадок и микробиологического окисления концентрация нефти на поверхности и растворенной в глубине водной среды убывает (Рис. 4а,

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ САЙКЛИНГ-ПРОЦЕССА

Сайклинг-процесс успешно применяется на газоконденсатных месторождениях в Северном море (например, месторождения Smorbukk, Sleipner Ost Ty), в России его эффективность показана лишь в рамках исследовательских работ. В статье приведены результаты вычислительных экспериментов по поиску возможностей повышения энергоэффективности сайклинг-процесса для условий небольших уникальноконденсатных месторождений.

Ключевые слова: сайклинг-процесс, повышение эффективности, газоконденсат, моделирование.

Сайклинг-процесс – способ разработки газоконденсатных месторождений с поддержанием пластового давления посредством обратной закачки газа в продуктивный горизонт, который решает две очень важные задачи разработки месторождения: поддержание пластового давления, которое препятствует происходящему вследствие ретроградной конденсации выделению в продуктивном горизонте из пластового газа высококипящих углеводородов, а следовательно и их вероятной потере; позволяет законсервировать запасы газа данного месторождения до момента, пока не образуются благоприятные условия для его реализации.

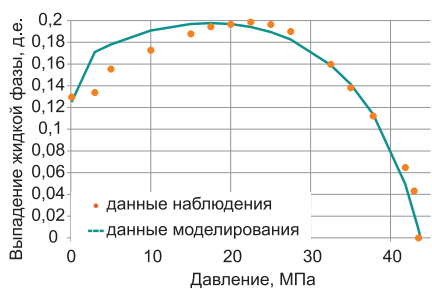


Рис. 1. Изотерма конденсации смоделированной пластовой системы.

Сайклинг-процесс успешно применяется на газоконденсатных месторождениях в Северном море (например, месторождения Smorbukk, Sleipner Ost Ty), в России его эффективность

показана лишь в рамках исследовательских работ. В работе (Брусилковский и др., 2009) приведен обзор критериев определения типов пластовых флюидов, где говорится, что, по оценке Р. Moses, начальный эксплуатационный газовый фактор для газоконденсатных залежей находится в диапазоне от 540 до 27000 см³/м³, при этом нижняя граница соответствует уникальноконденсатным залежам. Северо-Елтышевское месторождение можно отнести к уникальноконденсатным объектам.

Предпосылками осуществления сайклинг-процесса на этом месторождении являются: высокий конденсатогазовый фактор достигающий 861,4 г/м³ (1135 см³/м³); близость начального пластового давления (43,95 МПа) и давления начала конденсации (42,11 МПа); пластовая смесь имеет

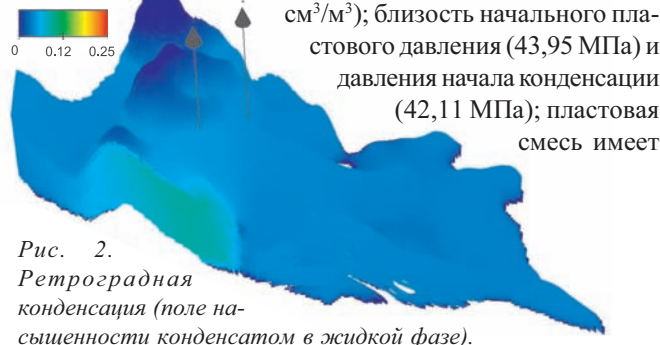


Рис. 2. Ретроградная конденсация (поле насыщенности конденсатом в жидкой фазе).

Окончание статьи А.А. Корнева, С.И. Дембицкого, М.Х. Уртенова «Математическое...»

б). Как видно из рис.4в количество выпадающей в осадок нефти увеличивается и постепенно стабилизируется. Одновременно, концентрация нефтеокисляющих микроорганизмов сначала растет по экспоненциальному закону, затем стабилизируется, а потом линейно убывает (Рис. 4г).

Предполагаемую математическую модель можно использовать для мониторинга поведения нефти в море при решении задач по предупреждению и ликвидации реальных аварийных разливов нефтепродуктов в Азовском море при проведении буровых работ и транспортировке.

Литература

- Дембицкий С.И., Дунаев И.М., Лаврентьев А.В., Ларионов А.В., Уртенов М.Х. Математические модели динамики и деструкции нефтяного slicka на акватории Черного моря. Краснодар. 2003.
Доценко С.А., Рясинцева Н.И., Савин И.П., Саркисова С.А.. Специфические черты гидрологического и гидрохимического режимов и уровня загрязнения прибрежной зоны моря в районе Одессы. Исследование шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна. Сб. научн. тр. МГИ НАН Украины. 1995.

А.А. Kornev, S.I. Dembitskij, M.K. Urtenov. **Mathematical modeling of oil pollution destruction in Sea of Azov.**

The mathematical model of the oil pollution destruction taking into consideration convective transport, diffusion, evaporation, dissolution, emulsification, disintegration, aggregation, microbiological destruction, sedimentation as the most specific for oil transformation in Sea of Azov is introduced.

Keywords: mathematical modeling, destruction, oil pollution, convection carry, diffusion, microbiological decomposition.

Алексей Александрович Корнев
Генеральный директор ООО "Прогрейс".

350007, Россия, г. Краснодар, ул. Песчаная, 9.
Тел.: (905)4387786.

Станислав Иосифович Дембицкий
Зав. каф. геофизических методов поисков и разведки,
проф., д.физ.-мат.н.

Махамед Хусеевич Уртенов
Зав. каф. прикладной математики, проф., д.физ.-мат.н.

Кубанский государственный университет
350007, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д.149.
Тел.: (961)5038918.