

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ И ЗАЩЕМЛЕННЫХ ЛЕГКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

**Н.К. Парамонова¹, Г.И. Голуб², И.Н. Запольский³,
О.И. Логвиненко⁴, Ю.А. Негода⁵**

(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Н.С. Огняником)

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Кандидат геологических наук, старший научный сотрудник.*

² *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Научный сотрудник.*

³ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: igorzapol@gmail.com
Младший научный сотрудник.*

⁴ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: lohvyunenکو.olha@gmail.com
Младший научный сотрудник.*

⁵ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: ynegoda2008@gmail.com
Младший научный сотрудник.*

Изложенное состояние изученности учета остаточных и защемленных легких нефтепродуктов (ЛНП) показало их противоречивость, а также то, что они не рассматривались для процесса колебания уровня грунтовых вод (УГВ).

Нами на основании физического моделирования и теоретического обоснования установлено следующее:

– остаточная полножидкостная насыщенность и остаточные насыщенности воды и ЛНП имеют параболическую зависимость от исходной насыщенности воды и ЛНП при дренировании из системы «ЛНП – вода» («о – w»);

– при естественном подъеме УГВ ЛНП (керосин) не переносится выше 10 см и защемляется в капиллярной зоне;

– при первичном и последующих опусканиях УГВ после формирования слоя с мобильным ЛНП остаточный ЛНП будет разным; даны способы его определения.

Ключевые слова: колебание УГВ, насыщенность (воды и легких нефтепродуктов) остаточная, защемленная, физическое моделирование.

INFLUENCE OF WATER TABLE FLUCTUATIONS ON FORMATION OF RETAINED AND TRAPPED LIGHT PETROLEUM PRODUCTS

**N.K. Paramonova¹, G.I. Golub², I.N. Zapolskiy³,
O.I. Logvinenko⁴, U.A. Negoda⁵**

(Recommended by doctor of geological-mineralogical sciences N.S. Ognianik)

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Candidate of geological sciences, senior scientific researcher.*

² *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Scientific researcher.*

³ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: igorzapol@gmail.com
Junior scientific researcher.*

© Н.К. Парамонова, Г.И. Голуб, И.Н. Запольский, О.И. Логвиненко, Ю.А. Негода, 2016

⁴ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: lohvyenko.olha@gmail.com
Junior scientific researcher.*

⁵ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: ynegoda2008@gmail.com
Junior scientific researcher.*

Described state of taking into account of residual and trapped light petroleum product saturations (LPP) demonstrates inconsistency and the fact that it was not considered for groundwater table fluctuations (WT).

We based on both physical modeling and theoretical substantiation, the following facts were established:

- a total residual saturation and residual water and LPP saturations have parabolic relationship from initial water and LPP saturations for draining a LPP-water system;
- during natural water table raise LPP (kerosene) moves no higher than 10 cm and trapped in a capillary zone;
- during initial and following water table lowering after mobile LPP layer accumulation, residual LPP content is different and methods for its determination are described.

Key words: water table fluctuations, saturation (water and light petroleum product) retain, trapped, physical modeling.

ВПЛИВ КОЛИВАННЯ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ТА ЗАЩЕМЛЕНИХ ЛЕГКИХ НАФТОПРОДУКТІВ

**Н.К. Парамонова¹, Г.І. Голуб², І.М. Запольський³,
О.І. Логвиненко⁴, Ю.О. Негода⁵**

(Рекомендовано д-ром геол.-мінерал. наук М.С. Огняником)

¹ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник.*

² *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Науковий співробітник.*

³ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: igorzapol@gmail.com
Молодший науковий співробітник.*

⁴ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: lohvyenko.olha@gmail.com
Молодший науковий співробітник.*

⁵ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: ynegoda2008@gmail.com
Молодший науковий співробітник.*

Представлений стан вивченості обліку залишкових і защемлених легких нафтопродуктів (ЛНП) показав їх суперечливість, а також те, що вони не розглядалися для процесу коливання рівня ґрунтових вод (РҐВ).

Нами на підставі фізичного моделювання і теоретичного обґрунтування встановлено таке: – залишкова повнорідинна насиченість і залишкові насиченості води та ЛНП мають параболічну залежність від вихідної насиченості води і ЛНП при дрениванні із системи «ЛНП – вода» («о – w»);

– при природному підйомі РҐВ ЛНП (гас) не переноситься вище 10 см і защемляється в капілярній зоні;

– при первинному і наступних опусканнях РҐВ після формування шару з мобільним ЛНП залишковий ЛНП буде різним; представлено способи його визначення.

Ключові слова: коливання РҐВ, насиченість (води та легких нафтопродуктів) залишкова, защемлена, фізичне моделювання.

Состояние изученности

Остаточные и заземленные легкие нефтепродукты (ЛНП), будучи малоподвижными или неподвижными, могут находиться в подземной среде долгие годы и благодаря их низкой растворимости в воде загрязнять водоносные горизонты длительный период времени. Природа этих загрязнений является причиной неправильных решений в санационных мероприятиях или приводит к меньшей эффективности. Поэтому исследования их распределения и транспорта в подземной среде становятся все более важными. Недоучет их в расчете многофлюидных потоков может переоценить объем ЛНП, который достигнет капиллярной зоны над водоносным горизонтом, и недооценить объем ЛНП, оставшийся в зоне аэрации (ЗА) и в водоносном горизонте.

ЛНП, поступая в ЗА в результате утечек из поврежденных нефтепроводов и хранилищ, движутся через поры и трещины грунта под влиянием гравитационной и капиллярной сил, оставляя после себя прерывистые включения остаточных удерживаемых и иммобилизованных недренлируемых ЛНП. Подъем уровня грунтовых вод (УГВ) приводит к их обволакиванию и обтеканию, переводя в заземленное состояние.

При наличии линзы мобильных ЛНП опускание УГВ влечет дренирование как воды, так и ЛНП, после чего остается недренлируемая остаточная насыщенность ЛНП в системе «воздух – вода» («а – w»). Подъем УГВ приводит к впитыванию воды и ЛНП в выше расположенной ЗА, оставляя в водоносном горизонте заземленный ЛНП.

В литературе часто подменяют понятия «остаточный» и «заземленный» ЛНП. Поэтому мы вслед за авторами работы [Geel, Roy, 2002] конкретизируем, что остаточная насыщенность ЛНП остается после дренирования ЛНП, который замещается воздухом в трехфлюидной системе «воздух – ЛНП – вода» («а – о – w»), т. е. когда смачивающий флюид замещается менее смачивающим. ЛНП и воздух становятся захваченными (заземленными), когда вода или ЛНП впитываются, и менее смачивающий флюид замещается более смачивающим.

Лабораторные эксперименты показали, что насыщенность остаточного ЛНП может быть значительной; по данным различных

определений [Mercer, Cohen, 1990] установлено, что она находится в пределах 0,006–0,5.

А.М. Dunn [Dunn, 2005] с помощью лабораторных экспериментов и численного моделирования (TOUGH/T2VOC) исследовала захват воздуха и жидкости неводной фазы в частично насыщенной кайме в процессе подъема УГВ. Не делая количественных заключений, отметила, что захват зависит от литологического состава пород, их гетерогенности и уменьшается с увеличением скорости подъема УГВ; вопрос захвата жидкости неводной фазы требует дальнейшего исследования.

R.G. Ryan и V.K. Dhir [Ryan, Dhir, 1993, 1996] экспериментально исследовали влияние размера частиц грунта (стеклянные шарики) и межповерхностного натяжения (σ_{ow}) на захват ЛНП (Soltrol 170) в процессе медленного подъема УГВ. Ими было установлено следующее:

– при диаметре частиц более 710 мкм количество захваченного ЛНП уменьшается; при диаметре частиц менее 710 мкм влияние их не сказывается;

– в исходно сухих частицах захват ЛНП был незначительным; исходная насыщенность водой на количество захваченного ЛНП не влияла;

– насыщенность захваченного ЛНП свя-

зана с числом Бонда
$$\left(Bo = \frac{\Delta\rho \times g \times D_p^2}{\sigma_{ow}} \right)$$
 зависимостью:

$$\tilde{\theta}_{ot} = 0,12394 - 0,16301Bo + 0,051585Bo^2, \quad (1)$$

где $\Delta\rho$ – разница между плотностью ЛНП и воды; g – гравитационное ускорение; D_p – диаметр частиц грунта; σ_{ow} – межповерхностное натяжение «ЛНП – вода» («о – w»).

Остаточный ЛНП, удерживаемый в ЗА после стекания вниз под влиянием гравитационных сил, также может быть заземлен водой при подъеме УГВ. J.R. Hunt и его соавторы [Hunt et al., 1988] исследовали механизм переноса отдельных капель ЛНП. Они сделали вывод, что подъем УГВ не сдвигает отдельных капель в ненасыщенной зоне. Условием выноса ЛНП из порового пространства является превышение капиллярного числа над числом Бонда:

$$\frac{V_n \mu_w}{\sigma_{ow}} > \frac{(\rho_w - \rho_o) g d_n^2}{\sigma_{ow}}, \quad (2)$$

где V_n – скорость движения воды в поре; μ_w – динамическая вязкость воды; d_n^2 – диаметр пор.

При разработке основополагающих моделей J.C. Parker и его соавторы [Parker et al., 1987] предположили, что в трехфлюидной системе в процессе дренирования в присутствии воды и воздуха ЛНП полностью дренируется благодаря его способности растекаться по поверхности «а – w», т. е. после длительного периода дренажа ЛНП в порах не остается. В этих моделях используются эффективные водная и полножидкостная насыщенности, в которых остаточный ЛНП (θ_{or}) не учитывается, а остаточное содержание воды (θ_{wr}) считается инвариантным. Это может привести к ошибкам в расчетах распределения содержания воды и ЛНП при дренировании и насыщении трехфлюидных систем, так как многие исследователи, проводившие лабораторные эксперименты, отмечали наличие остаточного ЛНП при дренировании трехфлюидной системы, который является как непрерывным (в верхней части капиллярной зоны), так и прерывным (в виде скоплений в уголках пор и подвешенных колец выше капиллярной зоны).

G.E. Hoag и M.C. Marley [Hoag, Marley, 1986], а также Jarsjль и его соавторы [Jarsjль et al., 1994] установили, что остаточная насыщенность ЛНП отрицательно коррелирует с насыщенностью воды.

D.A. Steffy и его соавторы [Steffy et al., 1997] оценили влияние предшествующего содержания влаги на остаточную насыщенность ЛНП для системы «декан – вода». Они выяснили, что остаточная насыщенность ЛНП является линейной функцией от предшествующего содержания влаги.

В работе [Van Geel, Roy, 2002] представлен ряд экспериментов, чтобы определить остаточную насыщенность ЛНП при дренировании трехфлюидной системы и оценить ее влияние на соотношение напор – насыщенность. Эксперименты выполнены при постоянной насыщенности воды ($\bar{\theta}_w = 18, 20$ и 40%) в кремниевом песке с добавлением 20, 30, 40 мл и до полного насыщения гептана, который затем дренировался до остаточной насыщенности. Сделан вывод, что

при дренировании трехфлюидной системы остаточная насыщенность ЛНП не зависит от насыщенности воды, а является функцией насыщенности ЛНП, предшествующей дренированию. Несмотря на то, что сделан вывод о невлинии насыщенности воды на остаточную насыщенность ЛНП при дренировании трехфлюидной системы, предлагается ее определение на основании кажущейся полножидкостной насыщенности в поворотной точке с основной ветки впитывания и ввод полученной величины в разработанные LP-модели* трехфлюидной системы.

E.L. Wipfler и S.E. van der Zee [Wipfler, van der Zee, 2001] представили разработки для учета остаточных ЛНП в ненасыщенной зоне после их дренирования из исходной двухфлюидной системы «ЛНП – вода» («o – w»). Рассматривается переход от свободного ЛНП к остаточному, под которым они понимают не только непрерывное содержание θ_{or} при $h_{ao} \rightarrow \infty$, но и прерывное содержание в подвешенных кольцах и контактных точках. Введены понятия критического напора (h_o^c), который разделяет двухфлюидную систему «а – w» с трехфлюидной системой «а – o – w» с недренируемым (прерывным) ЛНП, и напора (h_{ow}^c), который разделяет прерывный и непрерывный ЛНП, а также понятие критической полножидкостной насыщенности ($\bar{\theta}_\ell^c$), при которой ЛНП становится недренируемым. Последнюю необходимо определить экспериментально.

Для описания системы с недренируемым остаточным ЛНП используются зависимости, аналогичные представленным в работе J.C. Parker, R.J. Lenhard и др. [Parker, Lenhard et al., 1987]:

$$\bar{\theta}_{or} = \bar{\theta}_\ell - \bar{\theta}_w; \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_w = \left\{ 1 + \left[\alpha_{ow} (h_{or} - h_w) \right]^n \right\}^{-m}; \quad (4)$$

$$\bar{\theta}_\ell = \left\{ 1 + \left[\alpha_{ao} (h_a - h_{or}) \right]^n \right\}^{-m} = \bar{\theta}_\ell^c, \quad (5)$$

несмотря на то, что уравнения типа (4) и (5) там выведены для описания зависимостей $\theta(h)$ непрерывных флюидов. Кроме того, решение системы уравнений (3)–(5) возможно

* LP – основополагающие модели, разработанные J.C. Parker, R.J. Lenhard [Parker, Lenhard, 1987].

только с помощью итерации. Если $\tilde{\theta}_\ell^c$ принимается постоянным и экспериментально определенным (5), то также экспериментально можно найти $\tilde{\theta}_w$ и $\tilde{\theta}_o$ составляющие $\tilde{\theta}_\ell$ в недренируемой зоне остаточного ЛНП, и не вводить фиктивные напоры h_o^c и h_{ow}^c , которые практически измерить нельзя. Кроме того, решением уравнений (3)–(5) находятся эффективные насыщенности, которые нельзя перевести в содержание жидкостей, так как для этого необходимо знание их остаточных содержаний, которые определяются. Согласно уравнениям LP, которые используют авторы данной статьи, эффективное остаточное содержание жидкостей равно нулю.

Из приведенного обзора литературы видно, что выполненные исследования формирования остаточных и заземленных ЛНП часто противоречат друг другу; кроме того, они не рассматривались непосредственно для процесса колебания УГВ. В связи с этим перед нами стоит задача анализа и экспериментальной проверки описанных выше исследований и выводов в приложении их к колебанию УГВ.

Исследование наличия остаточных ЛНП после насыщения ими влажного песка и последующего дренирования

Этот процесс происходит при поднятии УГВ со сформировавшемся на нем слое мобильного ЛНП, а затем при его опускании. Как отмечалось выше, авторы работ [Parker et al., 1987] и [Lenhard, Parker, 1987] предположили, что в трехфлюидной системе в процессе дренирования в присутствии воды и воздуха ЛНП полностью дренируется благодаря его способности растекаться по поверхности «а – w», т. е. после длительного периода дренажа ЛНП в порах не остается. Поэтому при разработке основополагающих моделей трехфлюидных систем остаточный ЛНП не учитывался.

Для проверки данного положения проведены исследования по последовательному насыщению и дренированию преимущественно кварцевого песка сначала водой, а затем керосином, с фотографированием его через бинокляр микроскопа в поворотных состояниях. Было установлено, что после дренирования системы «а – о – w» в грунте

сохраняются остаточные как вода, так и ЛНП, которые должны учитываться в расчетах.

Из приведенного выше анализа исследований видно, что единого мнения относительно зависимости остаточного ЛНП при дренировании трехфлюидной системы нет. Так, различные авторы считают, что остаточный ЛНП зависит от:

- предшествующего содержания ЛНП [Van Geel, Roy, 2002];

- предшествующего содержания воды [Steffy et al., 1997; Hoag, Marley, 1986; Jarsj  et al., 1994];

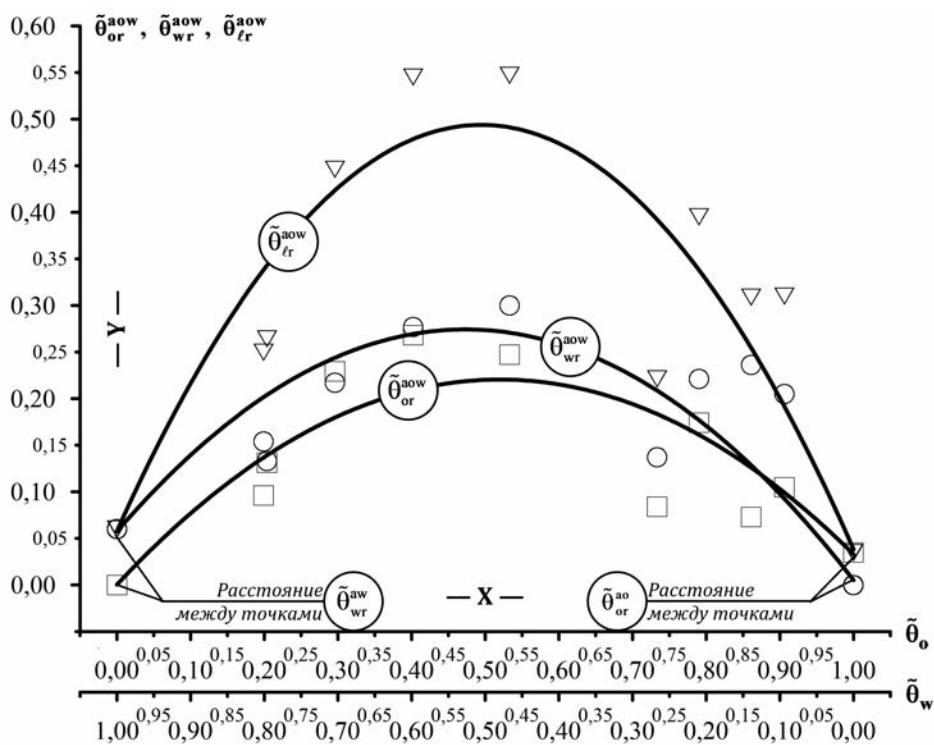
- остаточного полножидкостного содержания, которое определяется экспериментально [Wipfler, van der Zee, 2001].

Расчет количественного содержания насыщенности остаточного ЛНП представлен только в работе [Wipfler, van der Zee, 2001], комментарии к которому приведены выше. D.K. Eckberg, D.K. Sunada [Eckberg, Sunada, 1984] отмечают, что мелкозернистые грунты имеют более высокую остаточную насыщенность, а в работе [Zalidis et al., 1998] установлено, что остаточная полножидкостная насыщенность не превышает 20% и с увеличением остаточной насыщенности воды остаточная насыщенность ЛНП уменьшается.

Для конкретизации этого вопроса нами были проведены физические эксперименты по определению остаточного содержания воды и керосина (в качестве ЛНП) в приборе для измерения «насыщенность – капиллярное давление» при различных насыщенностях воды и керосина от 0 до 1*.

Первоначально в песке с пористостью 0,355–0,375 были сформированы двухфлюидные системы «о – w» и проведено дренирование керосина при постоянной первоначальной насыщенности воды. Затем образцы опять насытили водой и выполнили дренирование воды и керосина до остаточных их насыщенностей. Практически дренировалась вода, насыщенность остаточного керосина оставалась такой же, как и при первоначальном дренировании. Экспериментальные замеры аппроксимированы параболической зависимостью методом наименьших квадратов. Получены зависимости (рис. 1) насыщенности остаточных керосина и воды, а также остаточной полножидкостной насы-

* В предыдущих исследованиях опыты проводились при трех-четырёх значениях насыщенности ЛНП или воды.



Экспериментальные измерения :

для $\tilde{\theta}_{or}^{aow}$: Y1 = □; для $\tilde{\theta}_{wr}^{aow}$: Y2 = ○; для $\tilde{\theta}_{lr}^{aow}$: Y3 = ▽

Аппроксимационные измерения :

для $\tilde{\theta}_{or}^{aow}$: Y1 = 0,000402592595 + 0,8465718177 * X - 0,8139312555 * pow(X,2)

для $\tilde{\theta}_{wr}^{aow}$: Y2 = 0,05742024158 + 0,9169877886 * X - 0,9691489513 * pow(X,2)

для $\tilde{\theta}_{lr}^{aow}$: Y3 = 0,05782283418 + 1,763559606 * X - 1,783080207 * pow(X,2)

Рис. 1. Аппроксимационная зависимость остаточной насыщенности керосина ($\tilde{\theta}_{or}^{aow}$), воды ($\tilde{\theta}_{wr}^{aow}$) и полножидкостной насыщенности ($\tilde{\theta}_{lr}^{aow}$) от исходной насыщенности керосина (воды) в процессе дренирования из двухфлюидной системы «o – w»

Fig. 1. Approximation relationship of residual kerosene ($\tilde{\theta}_{or}^{aow}$), water ($\tilde{\theta}_{wr}^{aow}$) and total fluid ($\tilde{\theta}_{lr}^{aow}$) saturations from initial kerosene and water saturations during draining a two-fluid “o – w” system

щенности от насыщенности исходного керосина и, соответственно, воды, так как исходной была система «o – w».

Как видно на рис. 1, остаточная насыщенность керосина и полножидкостная насыщенность, а следовательно, и остаточная насыщенность воды имеют идентичную параболическую зависимость от исходной насыщенности как керосина, так и воды. В ранее выполненных исследованиях отмечалась зависимость от первоначального содержания воды или ЛНП, так как опыты проводились только при насыщенностях ЛНП или воды менее 0,5. Кроме того, получали зависимости линейные или логарифмические в зависимости от того, какой

диапазон насыщенности исследовался. Нами же рассмотрен весь диапазон возможных насыщенностей от 0 до 1. Так, при насыщенности ЛНП $\tilde{\theta}_o = 0$ насыщенность воды будет $\tilde{\theta}_w = 1$, насыщенность остаточного ЛНП – $\tilde{\theta}_{or} = 0$, а воды – $\tilde{\theta}_{wr}^{aw}$. При насыщенности ЛНП $\tilde{\theta}_o = 1$ насыщенность воды составляет $\tilde{\theta}_w = 0$ и остаточным будет только ЛНП $\tilde{\theta}_{or}^{ao}$. $\tilde{\theta}_{or}^{ao}$ и $\tilde{\theta}_{wr}^{aw}$ используются в основополагающей теории расчетов (LP) $\theta(h)$ для систем «a – w», «воздух – ЛНП» («a – o») и «a – o – w». Получают их, как правило, экспериментальным путем для систем «a – w», «a – o». Максимальные остаточные насыщенности воды, керосина и, соответственно, полножидкостной получены при исходных

равных насыщенностях воды и керосина ($\tilde{\theta}_o \approx \tilde{\theta}_w \approx 0,5$). Остаточная насыщенность воды была несколько больше остаточной насыщенности керосина, не превышая в сумме $\tilde{\theta}_{lr}^{aow} = 0,547$. Уравнения, аппроксимирующие $\tilde{\theta}_{or}^{aow}$, $\tilde{\theta}_{wr}^{aow}$ и $\tilde{\theta}_{lr}^{aow}$, полученные методом наименьших квадратов для экспериментального песка, приведены на рис. 1. Можно предположить, что и для других пород кривые зависимости остаточных жидкостных флюидов (воды и ЛНП) будут иметь параболическую форму, но описывающуюся другими уравнениями, что требует дальнейшего изучения. На данном этапе для получения значений насыщенности остаточных флюидов необходимы в каждом конкретном случае экспериментальные исследования.

Следует отметить, что проведенные исследования не подтвердили понятия критической полножидкостной насыщенности, при которой ЛНП становится недренируемым [Wipfler, van der Zee, 2001]. Соотношение остаточной полножидкостной насыщенности и остаточного керосина в наших исследованиях показано на рис. 1. На нем видно, что насыщенность остаточного керосина изменяется от 0 до максимального значения при $\tilde{\theta}_{lr}^{aow} \approx 0,5$ и составляет около 45% от $\tilde{\theta}_{lr}^{aow}$.

Формирование защемленных ЛНП в процессе подъема УГВ

Захват (защемление) ЛНП может возникнуть только при вытеснении его более смачивающим флюидом, что происходит при поднятии УГВ. Защемляется та часть ЛНП, которая остается в грунте после его выноса. Условие выноса определяется неравенством (2), в котором определяющую роль играют скорость движения воды в порах и размер их горловины. На связь захваченного ЛНП с числом Бонда (1) указано в работах [Ryan, Dhir, 1993, 1996]. Отметим, что J.R. Hunt и др. [Hunt et al., 1988] сделали вывод, что природный подъем УГВ не сдвигает отдельных капель в ЗА.

Нами проведены эксперименты по определению выноса и защемления керосина в капиллярной зоне при подъеме уровня воды (УВ). Для этого было сконструировано устройство, представленное на рис. 2.

Капиллярная зона «а – о – w» формируется в цилиндрической емкости, выполненной из пропиленовой трубы высотой 50 мм с внутренним диаметром 41 мм, ограниченной от поддона фильтром. Сверху наращивается (вкручивается) аналогичная цилиндрическая емкость для создания в ней зоны «а – w» высотой 110 мм. В опытах использовался песок с диаметром частиц 0,315–0,63 мм, промытый и прокаленный при $t = 600$ °С для устранения органики, влияющей на показания анализатора НП «Микран», с помощью которого производились определения содержания керосина в воде и песке.

Сначала формировалось заданное содержание воды в двух цилиндрах путем полного насыщения, а затем высушивания. Потом формировалось заданное содержание керосина в нижнем цилиндре с поддоном. Для этого в поддон через отверстие ⑤ подавалось некоторое количество воды, а через отверстие ④ – объем керосина, обеспечивающий заданное его содержание в нижнем цилиндре. Затем путем подачи воды в отверстие ⑤ увеличивали ее объем в поддоне, чтобы поверхность керосина коснулась нижней границы песка в цилиндре (следили за уровнем керосина в трубке, ввинченной в отверстие ④). В таком состоянии цилиндр оставляли на двое суток, чтобы произошло капиллярное поднятие керосина в увлажненном песке цилиндра. Затем снова подавалась вода в отверстие ⑤, имитирующая подъем УГВ до ее появления на поверхности песка в верхнем цилиндре. Скорость подъема УВ была минимально возможной, дискретной и примерно одинаковой (обеспечивающей скорость движения воды в порах 17,2 см/ч, или 0,0048 см/с). После послойного (3,5 см) отбора воды с помощью шприца взяты по всей высоте цилиндра пробы грунта на содержание керосина.

Пробы воды из верхнего цилиндра имели концентрацию керосина 26–35 мг/л, что является немного выше его растворимости. Пробы воды, отобранные в нижнем цилиндре, имели концентрацию, превышающую растворимость керосина примерно в 10 раз. Это говорит о том, что при отборе гравитационной воды шприцом захватывался также частично капиллярный керосин. Однако это

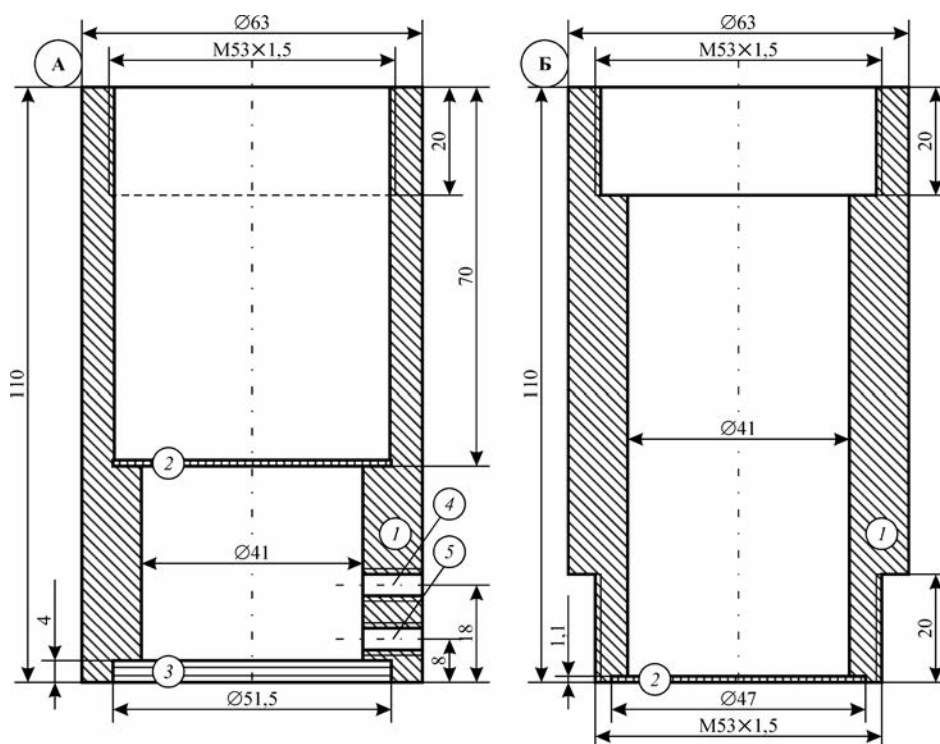


Рис. 2. Устройство для физического моделирования защемления ЛНП (керосина) в капиллярной зоне при подъеме УВ

А – цилиндрическая емкость с поддоном; **Б** – цилиндрическая емкость для наращивания по высоте.

① – стенка цилиндрической емкости; ② – фильтр; ③ – заглушка; ④ – отверстие для подачи ЛНП; ⑤ – отверстие для подачи воды

Fig. 2. Equipment for physical modeling of LPP (kerosene) entrapment in a capillary zone during water table raise

A – a cylinder with a pan; **B** – a cylinder for heightening.

① – a cylinder wall; ② – a filter; ③ – a plug; ④ – a kerosene input vent; ⑤ – a water input vent

уменьшило объем оставшегося в песке керосина не более чем на сотые доли процента.

Содержание захваченного водой керосина в песке нижнего ($\theta_{от1}$) и верхнего ($\theta_{от2}$) цилиндров показано на рис. 3, который прежде всего отражает его зависимость от исходного полножидкостного ($\theta_\ell = \theta_w + \theta_o$) содержания.

Нами проведены четыре опыта при одинаковом содержании керосина $\theta_o = 0,03$, но при увеличивающемся содержании воды ($\theta_w = 0,001 \div 0,05$), которые показали увеличение объема захваченного водой керосина как в нижнем цилиндре (от 0,006 до 0,014), так и в верхнем (от 0,0004 до 0,00110). Это говорит о том, что вынос и защемление керосина зависят от того, в каких порах находился керосин в исходном состоянии, а это определяется не только содержанием керосина, но и содержанием воды, занимающей более мелкие поры. Таким образом,

проведенные эксперименты не подтвердили вывода, представленного в работах [Ryan, Dhir, 1993, 1996], что исходная насыщенность воды не влияет на количество захваченного ЛНП.

В верхнем цилиндре наблюдался захваченный керосин, который был вынесен из нижнего цилиндра при подъеме УВ. Содержание его было на порядок меньше, чем в нижнем, но все-таки увеличивалось с ростом исходного полножидкостного содержания. Это объясняется тем, что, согласно неравенству (2), керосин выносился из пор диаметром

$$d > \sqrt{\frac{V\mu}{\Delta\rho g}} = \sqrt{\frac{0,0048 \times 1}{0,2 \times 981}} = 0,005 \text{ см,}$$

а поверхность «а – о» в экспериментах находилась при $\theta_\ell < 0,06$ см в порах диаметром менее 0,0056 см, а при максимальном $\theta_\ell = 0,25$ – в порах диаметром 0,02 см.

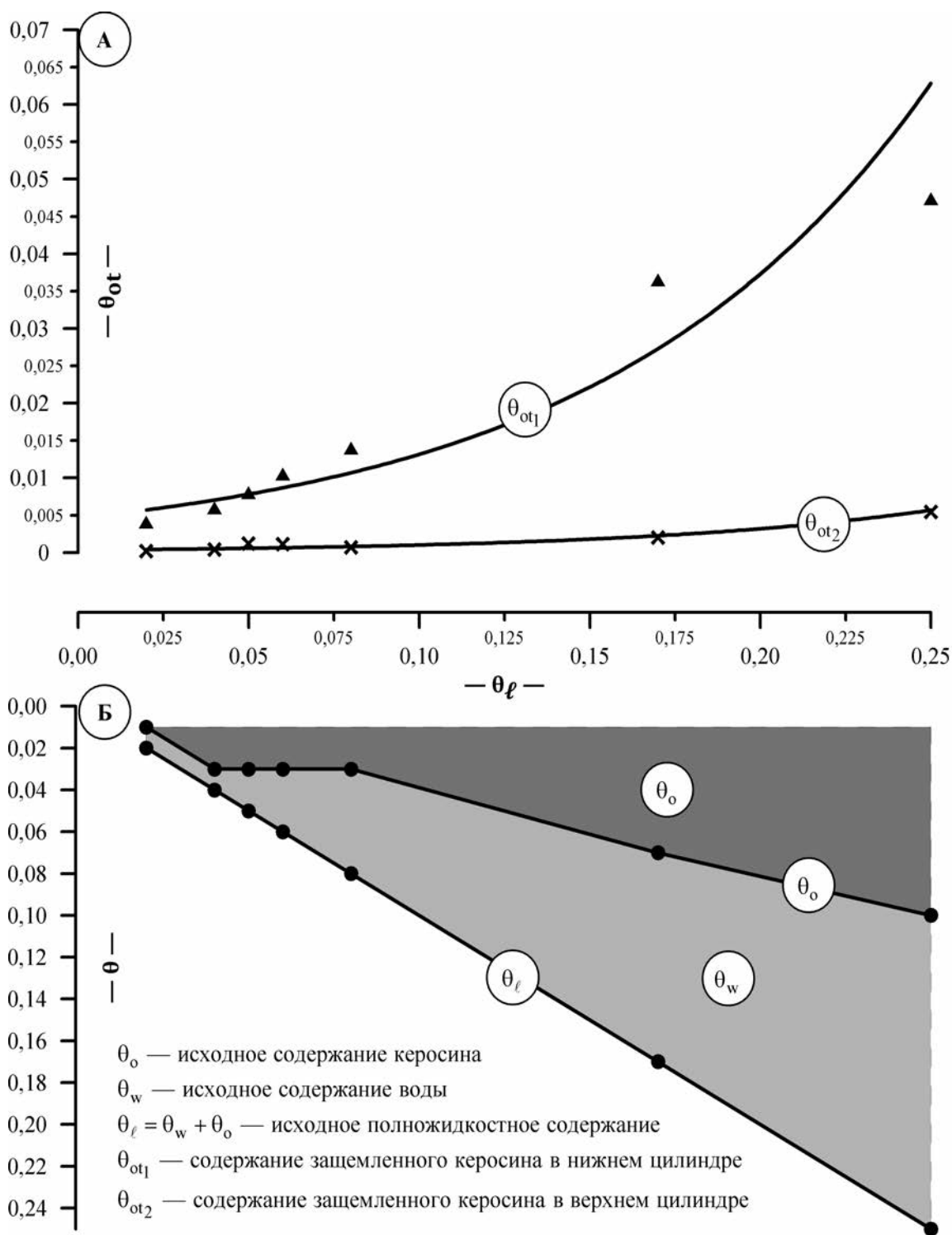


Рис. 3. Зависимость **(А)**, полученная по экспериментальным данным, содержания захваченного керосина (θ_{ot}) от исходного полножидкостного содержания ($\theta_{\ell} = \theta_w + \theta_o$) в капиллярной зоне **(Б)** при подъеме УВ

Fig. 3. Relationship **(А)** of trapped kerosene content ($\theta_{\ell} = \theta_w + \theta_o$) from initial total fluid content ($\theta_{\ell} = \theta_w + \theta_o$) in a capillary zone **(Б)** during water table raise determined experimentally

Расчет проведен согласно изложенному в монографии [Огняник и др., 2006]:

$$r = \frac{2\sigma_{ao}}{h\rho g}; \quad h = \frac{1}{\alpha_{ao}^d} \left[\left(\frac{1}{\theta_\ell} \right)^m - 1 \right]^{\frac{1}{\varepsilon}};$$

$$\theta_\ell = \frac{\theta_\ell - \theta_{or}}{\theta_s - \theta_{or}}; \quad d = 2r,$$

где по экспериментальным данным $\theta_s = 0,335$; $\alpha_{ao}^d = 0,9732 \frac{1}{2}$; $\varepsilon = 7,491$; $m = 0,7432$; $\theta_r = 0,04$;
 $\sigma_{ao} = 35,94 \frac{\text{дин}}{\text{см}}$.

В песке верхнего цилиндра поверхность «а – о» во всех экспериментах, за исключением опытов с $\theta_w = 0,1$ и $0,15$, находится в порах диаметром менее $0,005$ см; поэтому дальнейший вынос керосина при подъеме УВ происходит не будет – он весь защемляется водой.

Выполненные эксперименты показали, что даже при скорости подъема УВ $17,2$ см/ч, что значительно больше природной скорости подъема УГВ, керосин из капиллярной каймы будет выноситься на высоту чуть более 10 см. Этим мы подтверждаем вывод, сделанный J.R. Hunt и др. [Hunt et al., 1988], что природный подъем УГВ не сдвигает отдельных капель ЛНП в ЗА.

Однако проведенные нами эксперименты имеют недостатки:

- исходное содержание воды и керосина в цилиндрах не измерялось по вертикали, а принималось осредненным в объеме песка;

- эксперименты были выполнены при одной скорости подъема УВ и с одним грунтом (песок с диаметром частиц $0,315$ – $0,63$ мм) и ЛНП (керосином).

Поэтому исследования выноса ЛНП и защемления его в капиллярной зоне следует продолжить, чтобы усовершенствовать формирование исходной капиллярной зоны воды и ЛНП, выполнить опыты при разных скоростях подъема УВ и с разными по литологическому составу грунтами, а также с дистанционной фиксацией содержания воды и ЛНП в грунтах без нарушения сплошности.

Формирование остаточных ЛНП в процессе опускания УГВ

В процессе опускания УГВ происходит дренажное не только воды, но и ЛНП и переход двухфлюидной системы «о – w» в трехфлюидную «а – о – w». При наличии слоя с мобильным ЛНП наблюдается его опускание вместе с опусканием УГВ и уменьшение мощности как в наблюдательной скважине, так и в окружающих отложениях. Согласно монографии [Огняник и др., 2006], мощность слоя с мобильным ЛНП в отложениях (T_o) связана с мощностью ЛНП в скважине (T_o^w) уравнением:

$$T_o = T_o^w - \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}, \quad (6)$$

где h_d^{ao} – напор смещения ЛНП в воздух; ρ_r – относительный удельный вес ЛНП, равный γ_o / γ_w .

При $T_o^w \leq \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$ мобильный ЛНП в отло-

жениях исчезает, т. е. переходит в капиллярное, а затем при дальнейшем стекании в остаточное состояние.

Если опускание УГВ происходит сразу после формирования слоя с мобильным ЛНП, то выше капиллярной трехфлюидной зоны «а – о – w», которая образуется над слоем с мобильным ЛНП после стекания воды и ЛНП, находится зона с остаточным ЛНП. Содержание остаточных воды и ЛНП через определенное время (в зависимости от начального содержания и времени стекания) станет постоянным (θ_{wr}^{aow} и θ_{or}^{aow}), если УГВ опустится на глубину, превышающую мощность капиллярной зоны воды (h_w^c).

Процесс стекания воды и керосина изучался нами в колонне с песком высотой $146,7$ см, оборудованной скважиной, после формирования в ней слоя с мобильным керосином и последующего опускания и подъема УГВ.

В процессе спуска мобильного керосина фиксировалось содержание остаточных керосина и воды в песке колонны объемным способом в течение 69 дней, которые установились примерно одинаковыми: $\theta_{wr}^{aow} = 0,0262$, а $\theta_{or}^{aow} = 0,02614$. Затем выполнили насыщение водой песка в колонне, которая защемила весь остаточный

керосин (в скважине не было даже пленки), и повторный спуск воды в течение 120 дней. Вместе с водой начал опять выходить керосин до остаточного содержания $\theta_{or}^{aow} = 0,025$.

Проведенный опыт показал, что если время опускания УГВ больше времени установления стабильного остаточного содержания ЛНП, то $\theta_o = \theta_{or}^{aow}$. Если время опускания УГВ будет меньше времени установления стабильного остаточного ЛНП, то θ_{or}^{aow} будет разным, в зависимости от литологического состава, первоначального насыщения, интервала и времени опускания УГВ. Эту зависимость необходимо получать экспериментально для характерных интервалов понижения УГВ. Можно определить ее также моделированием, но для этого необходимо знать параметры уравнения VG, куда входят и остаточные содержания θ_{wr} и θ_{or} .

По имеющемуся экспериментальному изменению содержания остаточного ЛНП во времени определяется содержание остаточного ЛНП на глубине z_i . Для этого необходимо установить время стекания ЛНП (воды) на этой глубине (Δt_{z_i}). На глубине z_i , которая соответствует глубине УГВ на время $(t - 1)$, время стекания составит $\Delta t = t - (t - 1)$. На время t УГВ находится на глубине z_n . Тогда

$$\Delta t_{z_i} = \Delta t \left(1 - \frac{\Delta z_{1-i}}{\Delta z_{1-n}} \right). \quad (7)$$

По значению Δt_{z_i} согласно экспериментальной зависимости находятся значения $\theta_{wr_{z_i}}$ и $\theta_{or_{z_i}}$.

Если опускание УГВ происходит после подъема УГВ, который заземил капиллярный или остаточный ЛНП, то происходит его разгерметизация и стекание как воды, так и ЛНП, и до какого-то момента капиллярное давление h_{aw} в порах будет контролироваться поверхностью «а – w», которое обусловит кажущуюся насыщенность воды, включающую как содержание воды, так и содержание ЛНП. Расчет выполняется по соответствующей ветке насыщения для системы «а – w». Кроме того, содержание воды определяется поверхностью «о – w», которая формирует капиллярный напор h_{aw} , определяющий содержание воды в системе «о – w», расчеты которой при

любой ветке насыщения приведены в монографии [Огняник и др., 2006]. Тогда содержание ЛНП (θ_o) можно представить как $\theta_o = \theta_w^{aw} - \theta_w^{ow}$.

Если $\theta_w^{aw} > \theta_w^{ow}$, то тогда $\theta_o = \theta_{or}^{aow}$, которое находится описанным выше способом.

Выводы

1. Выполненный анализ состояния изученности учета остаточных и заземленных ЛНП показал их противоречивость, а также то, что они не рассматривались для процесса колебания УГВ.

2. Результаты фотографирования песка (с помощью бинокля микроскопа) после его насыщения и дренирования сначала водой, а затем керосином показали, что после дренирования системы «а – о – w» в грунте сохраняются остаточные как вода, так и ЛНП, которые должны учитываться в расчетах.

3. Выполнено физическое моделирование процесса дренирования воды и керосина из системы «о – w» в песке с пористостью 0,355–0,375 при диапазоне исходных насыщенныхностей 0 ÷ 1 до их остаточных содержаний. Аппроксимация экспериментальных замеров показала, что остаточные насыщенности воды и керосина, а также остаточная полножидкостная насыщенность имеют параболическую зависимость от исходной насыщенности воды (керосина). Максимальные значения насыщенностей остаточных воды и керосина и, соответственно, полножидкостной насыщенности получены при исходных $\tilde{\theta}_o \approx \tilde{\theta}_w \approx 0,5$. Остаточная насыщенность воды была несколько больше остаточной насыщенности керосина. Максимальная полножидкостная насыщенность $\tilde{\theta}_{tr}^{aow} = 0,5$.

Для теоретического обобщения формирования и учета остаточных ЛНП и воды необходимы дальнейшие исследования с разными как грунтами, так и ЛНП.

4. Выполненные эксперименты показали, что при скорости подъема УВ 17,2 см/ч (что значительно больше природной скорости подъема УГВ) керосин из капиллярной зоны в песке будет выноситься на высоту чуть более 10 см. Этим мы подтвердили вывод, сделанный J.R. Hunt и др. [Hunt et al., 1988], что природный подъем УГВ не сдвигает отдельных капель ЛНП в ЗА, а зазем-

ляет их. Условием выноса ЛНП из порового пространства является превышение капиллярного числа над числом Бонда (см. неравенство (2)).

5. Физическое моделирование опускания УГВ после формирования слоя с мобильным керосином в песке колонны показало, что вслед за понижением УГВ происходит стекание как воды, так и керосина до их постоянных остаточных содержаний (θ_{or}^{aow} , θ_{wr}^{aow}). Если время опускания УГВ меньше времени установления стабильного остаточного ЛНП

(воды), то $\theta_{wr, t}^{aow}$ и $\theta_{or, t}^{aow}$ будут разными, в зависимости от литологического состава, первоначального насыщения, интервала и времени опускания УГВ. Эту зависимость на данном этапе необходимо получать экспериментально для характерных интервалов понижения УГВ. По ней для интересующей глубины z_i определяется свое остаточное содержание воды $\theta_{wr, t}^{aow}$ и ЛНП $\theta_{or, t}^{aow}$ по времени стекания, которое находится по формуле (7).

Список литературы / References

1. Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Брикс А.Л., Пашковский И.С., Коннов Д.В. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев: А. П. Н., 2006. 278 с.

Ognianuk N.S., Paramonova N.K., Bricks A.L., Pashkovskiy I.S., Konnov D.V., 2006. The fundamentals of studying of subsurface contamination with light petroleum products. Kiev: A. P. N., 278 p. (in Russian).

2. Dunn A.M. Air and LNAPL entrapment in the partially saturated fringe. Dr. of Philosophy sci., diss. Notre Dame, Indiana, 2005. 99 p.

Dunn A.M., 2005. Air and LNAPL entrapment in the partially saturated fringe. Dr. of Philosophy sci., diss. Notre Dame, Indiana, 99 p. (in English).

3. Eckberg D.K., Sunada D.K. Nonsteady three-phase immiscible fluid distribution in porous media. *Water Resour. Res.* 1984. Vol. 20 (12). P. 1891–1897.

Eckberg D.K., Sunada D.K., 1984. Nonsteady three-phase immiscible fluid distribution in porous media. *Water Resour. Res.*, vol. 20 (12), p. 1891–1897 (in English).

4. Hoag G.E., Marley M.C. Gasoline residual saturation in unsaturated uniform aquifer materials. *J. Environ. Eng.* 1986. № 3. P. 586–604.

Hoag G.E., Marley M.C., 1986. Gasoline residual saturation in unsaturated uniform aquifer materials. *J. Environ. Eng.*, № 3, p. 586–604 (in English).

5. Hunt J.R., Sitar N., Udell K.S. Nonaqueous phase liquid transport and clean up. *Water Resour. Res.* 1988. Vol. 24 (8). P. 1247–1258.

Hunt J.R., Sitar N., Udell K.S., 1988. Nonaqueous phase liquid transport and clean up. *Water Resour. Res.*, vol. 24 (8), p. 1247–1258 (in English).

6. Jarsjӓ J., Destouni Q., Yaron B. Retention and volatilisation of kerosene laboratory experiments on glacial and post-glacial soils. *J. Contam. Hydrology*. 1990. № 17. P. 167–185.

Jarsjӓ J., Destouni Q., Yaron B., 1990. Retention and volatilisation of kerosene laboratory experiments on glacial and post-glacial soils. *J. Contam. Hydrology*, № 17, p. 167–185 (in English).

7. Lenhard R.J., Oostrom M. A parametric model for predicting relative permeability-saturation-capillary pressure relationship of oil-water systems in porous media with mixed wettability. *Transport in Porous Media*. 1998. Vol. 31. P. 109–131.

Lenhard R.J., Oostrom M., 1998. A parametric model for predicting relative permeability-saturation-capillary pressure relationship of oil-water systems in porous media with mixed wettability. *Transport in Porous Media*, № 31, p. 109–131 (in English).

8. Lenhard R.J., Parker J.C. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow. *Water Resour. Res.* 1987. Vol. 23 (12). P. 2197–2206.

Lenhard R.J., Parker J.C., 1987. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow. *Water Resour. Res.*, vol. 23 (12), p. 2197–2206 (in English).

9. Mercer J.W., Cohen R.M. A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation. *J. Contam. Hydrology*. 1990. № 6. P. 107–163.

Mercer J.W., Cohen R.M., 1990. A review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation. *J. Contam. Hydrology*, № 6, p. 107–163 (in English).

10. Parker J.C., Lenhard R.J., Kuppusamy T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. *Water Resour. Res.* 1987. Vol. 23 (4). P. 618–624.

Parker J.C., Lenhard R.J., Kuppusamy T., 1987. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. *Water Resour. Res.*, vol. 23 (4), p. 618–624 (in English).

11. Ryan R.G., Dhir V.K. The effect of soil-particle size on hydrocarbon entrapment near a dynamic water table. *J. Contam. Hydrology*. 1993. № 2. P. 59–92.

Ryan R.G., Dhir V.K., 1993. The effect of soil-particle size on hydrocarbon entrapment near a dynamic water table. *J. Contam. Hydrology*, № 2, p. 59–92 (in English).

12. Ryan R.G., Dhir V.K. The effect of interfacial tension on hydrocarbon entrapment and mobilization near a dynamic water table. *J. Contam. Hydrology*. 1996. Vol. 5 (1). P. 1–26.

Ryan R.G., Dhir V.K., 1996. The effect of interfacial tension on hydrocarbon entrapment and mobilization near a dynamic water table. *J. Contam. Hydrology*, vol. 5 (1), p. 1–26 (in English).

13. Steffy D.A., Barry D.A., Johnston C.D. Influence of antecedent moisture content on residual LNAPL saturation. *J. Soil Contam.* 1997. Vol. 6 (2). P. 113–147.

Steffy D.A., Barry D.A., Johnston C.D., 1997. Influence of antecedent moisture content on residual LNAPL saturation. *J. Soil Contam.*, vol. 6 (2), p. 113–147 (in English).

14. Van Geel P.J., Roy S.D. A proposed model to include a residual NAPL saturation in a hysteretic capillary pressure-saturation relationship. *J. Contam. Hydrology*. 2002. № 58. P. 79–110.

Van Geel P.J., Roy S.D., 2002. A proposed model to include a residual NAPL saturation in a hy-

steretic capillary pressure-saturation relationship. *J. Contam. Hydrology*, № 58, p. 79–110 (in English).

15. Van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1980. Vol. 44 (5). P. 892–898.

Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, vol. 44 (5), p. 892–898 (in English).

16. Wipfler E.L., van der Zee S.E. A set of constitutive relationships accounting for residual NAPL in the unsaturated zone. *J. Contam. Hydrology*. 1990. № 50. P. 53–77.

Wipfler E.L., van der Zee S.E., 1990. A set of constitutive relationships accounting for residual NAPL in the unsaturated zone. *J. Contam. Hydrology*, № 50, p. 53–77 (in English).

17. Zalidis G.C., Wallace R.B., Voice T.C. Influence of initial water saturation on the residual saturation of an organic liquid in the vadose zone. *Water Resour. Manage.* 1998. № 12. P. 81–93.

Zalidis G.C., Wallace R.B., Voice T.C., 1998. Influence of initial water saturation on the residual saturation of an organic liquid in the vadose zone. *Water Resour. Manage.*, № 12, p. 81–93 (in English).

Статья поступила
08.09.2015