

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БАЗА РАСЧЕТА ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ В ЗАГРЯЗНЕННОЙ ЛЕГКИМИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В ПРОЦЕССЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

Статья 1. Теоретическая база расчета двухфлюидной системы
«воздух – смачивающий флюид» в пористой среде

Н.С. Огняник¹, Н.К. Парамонова²

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Доктор геолого-минералогических наук, профессор.*

² *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.*

На основании основополагающих уравнений R.J. Lenhard, J.C. Parker [Lenhard, Parker, 1987] разработана теоретическая база расчета каждого из путей впитывания и дренирования двухфлюидной системы «воздух – смачивающий флюид». Для каждой ветви рассмотрена ее идентификация, выполнены расчет содержания смачивающего флюида по известным капиллярным напорам, расчет капиллярных напоров и напоров флюидов по известному их содержанию, а также расчет проницаемости смачивающего флюида.

Ключевые слова: смачивающий флюид (вода, легкие нефтепродукты), воздух, содержание, насыщенность, капиллярный напор, относительная проницаемость.

THEORETICAL FOUNDATION FOR CALCULATION OF FLUID SYSTEMS IN THE SUBSURFACE CONTAMINATED WITH LIGHT PETROLEUM PRODUCTS DURING GROUNDWATER FLUCTUATION

Paper 1. Teoretical foundation for calculation
“air – wetting fluid” two-phase systems in porous media

N.S. Ognianik¹, N.K. Paramonova²

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Doctor of geological sciences, professor.*

² *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Candidate of geological sciences, senior scientific researcher.*

On the basis of governing relations R.J. Lenhard, J.C. Parker [Lenhard, Parker, 1987] the theoretical foundation for every imbibition and drainage pass of air wetting fluid systems are developed. Identification of pass saturation, the theory of wetting fluid content calculation over known capillary heads, calculation of capillary heads and fluid heads over known their content and wetting fluid permeability in porous media are described.

Key words: wetting fluid (water, light petroleum products), air, content, saturation, capillary head, relative permeability.

ТЕОРЕТИЧНА БАЗА РОЗРАХУНКУ ФЛЮЇДНИХ СИСТЕМ У ЗАБРУДНЕНОМУ ЛЕГКИМИ НАФТОПРОДУКТАМИ ГЕОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ У ПРОЦЕСІ КОЛИВАННЯ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД

Стаття 1. Теоретична база розрахунку двофлюїдної системи
«повітря – змочуючий флюїд» у пористому середовищі

М.С. Огняник¹, Н.К. Парамонова²

¹ Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Доктор геолого-мінералогічних наук, професор.

² Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua
Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник.

На підставі основоположних рівнянь R.J. Lenhard and J.C. Parker [Lenhard, Parker, 1987] розроблено теоретичну базу розрахунку кожного із шляхів убирання та дренажу двофлюїдної системи «повітря – змочуючий флюїд». Для кожної гілки розглянуто її ідентифікацію, виконано розрахунок вмісту змочуючого флюїду за відомим капілярним напором, розрахунок капілярних напорів і напорів флюїдів за їх відомим вмістом, а також розрахунок проникності змочуючого флюїду.

Ключові слова: змочуючий флюїд (вода, легкі нафтопродукти), повітря, вміст, насиченість, капілярний напір, відносна проникність.

Введение

В геоэкологических работах всех государств одно из главных мест занимает ликвидация или локализация нефтепродуктового загрязнения, реабилитация загрязненных участков, прогноз распространения загрязнения и оценка его опасности для хозяйственных и природных объектов. Решение этих задач усложняется разнообразием форм нахождения и миграции жидких легких нефтепродуктов (ЛНП) в геологической среде (ГС).

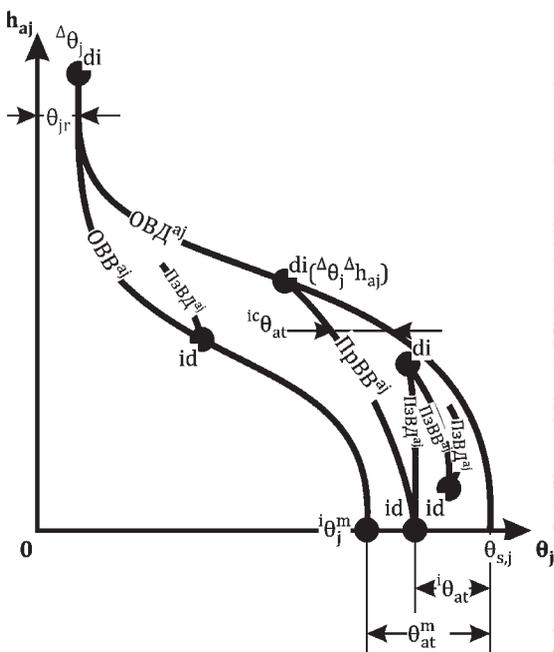
Чтобы решить перечисленные задачи, необходимо четко знать, в каком состоянии и в каком количестве находится загрязнитель, какие факторы и как будут влиять на его состояние.

Одним из факторов, наиболее ощутимо действующих на состояние легкого нефтепродуктового загрязнения в ГС, является колебание уровня грунтовых вод (УГВ), которое, наряду с незначительным растворением ЛНП, приводит к перемещению мобильного ЛНП по вертикали, изменяя его количество в грунте при увеличивающейся или уменьшающейся мощности слоя с мобильным ЛНП, переводя его в капиллярное, остаточное или защемленное состояние. Эти явления наблюдались на линзах авиационного керосина, сформировавшихся в районе авиабаз городов Узин, Прилуки, Луцк, где с

подъемом УГВ мощность слоя с мобильным ЛНП уменьшалась и даже исчезала, а при опускании УГВ вновь появлялась и увеличивалась даже после откачивания ЛНП.

Работы, посвященные расчету распределения содержания и объема воды и жидких ЛНП в линзе в условиях колебания УГВ, практически отсутствуют. Большинство публикаций [CONCAWE, 1979; Hall et al., 1984; Hampton et al., 1992] посвящено отысканию действительной мощности (в грунте) мобильного ЛНП в сформировавшейся линзе по замерянной кажущейся мощности (в скважине). А.М. Farr и его соавторы [Farr et al., 1990], R.J. Lenhard, J.C. Parker [Lenhard, Parker, 1990] представили расчеты удельного общего объема и содержания ЛНП в грунте по его уровням в наблюдательной скважине для равновесного состояния флюидов, но при этом не произвели расчленения по состоянию находящегося там ЛНП. В работах [Парамонова, 2002; Огняник и др., 2006, 2013] разработана (с учетом существующих до этого публикаций) методика расчета действительной мощности и распределения содержания мобильного и капиллярного ЛНП в линзе, сформировавшейся на УГВ, на водоупоре и на капиллярной кайме грунтового водоносного горизонта, а также подтверждено это соответствующими опытами в колонне с песком.

При колебании УГВ происходят процессы впитывания и дренирования как воды, так и ЛНП, а также защемления воздуха и ЛНП во время формирования двухфлюидных систем «воздух – смачивающий флюид» («а – j»), «ЛНП – вода» («о – w») и трехфлюидной системы «воздух – ЛНП – вода» («а – о – w»). В качестве смачивающего флюида (j) может выступать как вода (w), так и ЛНП (o). При этом образуются различные ветки насыщения и дренажа, характеризующиеся разными соотношениями содержания ЛНП и воды и, соответственно, различными их проницаемостями (k) и напорами (h). Знание этих параметров необходимо для расчета количества загрязнителя, его распределения и переноса в грунте, для расчета количества возможного отбора загрязнителя в процессе санацион-



Графики возможных путей дренирования и впитывания в системе «а – j»

θ_j – содержание смачивающего флюида (j); $\theta_{s,j}$ – при полной насыщенности, θ_j^m – максимальное содержание в процессе ОВВ^{aj}, $\theta_{j,r}$ – минимальное неустранимое непрерывное остаточное содержание при дренировании смачивающего флюида;

θ_{at}^m – максимальное содержание захваченного воздуха (а) в процессе ОВВ^{aj};

θ_{at} – максимальное содержание захваченного воздуха (а) в процессе ПрВВ^{aj};

θ_{at}^{ic} – текущее содержание захваченного воздуха в процессе ПрВВ^{aj};

ных работ, для определения остаточного содержания загрязнителя в грунте и прогноза его уменьшения за счет естественной деградации и ассимилятивной способности ГС.

В данной статье приведена теоретическая база расчета системы «а – j». Теоретическая база расчета систем «о – w» и «а – о – w» будет изложена в последующих двух статьях.

Теоретическая база расчета системы «а – j» базируется на основополагающих уравнениях R.J. Lenhard, J.C. Parker [Lenhard, Parker, 1987]*, которые записаны для каждой возможной ветки впитывания и дренирования: основная ветвь дренирования (ОВД^{aj}), основная ветвь впитывания (ОВВ^{aj}), промежуточная ветвь впитывания (ПрВВ^{aj}), произвольная ветвь дренирования (ПзВД^{aj}), произвольная ветвь впитывания (ПзВВ^{aj}), которые показаны на рисунке.

h_{aj} – капиллярный напор на границе воздуха и смачивающего флюида;

id – индекс поворотной точки от процесса впитывания к процессу дренирования;

di – индекс поворотной точки от процесса дренирования к процессу впитывания;

$\Delta\theta_j, \Delta h_{aj}$ – содержание смачивающего флюида и капиллярного напора в поворотной точке;

ОВД^{aj} – основная ветвь дренирования;

ОВВ^{aj} – основная ветвь впитывания;

ПрВВ^{aj} – промежуточная ветвь впитывания;

ПзВД^{aj} – произвольная ветвь дренирования;

ПзВВ^{aj} – произвольная ветвь впитывания

Two-phase wetting fluid content-capillary head relationship for drianage and imbibition saturation path

θ_j – wetting fluid content (j); $\theta_{s,j}$ – for total wetting fluid saturation, θ_j^m – maximum content to ОВВ^{aj} path, $\theta_{j,r}$ – minimum / continuous residual content to ОВД^{aj} path;

θ_{at}^m – maximum content of entrapped air to ОВВ^{aj} path;

θ_{at} – maximum content of entrapped air to ПрВВ^{aj} path;

θ_{at}^{ic} – current content of entrapped air to ПрВВ^{aj} path;

h_{aj} – capillary head at “air – wetting fluid” boundary;

id – index of the reversal from imbibition to drainage;

di – index of the reversal from drainage to imbibition;

$\Delta\theta_j, \Delta h_{aj}$ – wetting content and capillary head corresponding to the reversal point;

ОВД^{aj} – main drainage curve;

ОВВ^{aj} – main imbibition curve;

ПрВВ^{aj} – intermediate imbibition curve;

ПзВД^{aj} – arbitrary drainage curve;

ПзВВ^{aj} – arbitrary imbibition curve

* В русскоязычном изложении основополагающие уравнения приведены в монографии [Огняник и др., 2006].

Для каждой ветви рассмотрены ее идентификация, расчет содержания смачивающего флюида по известным капиллярным напорам, расчет капиллярных напоров и напоров смачивающего флюида по его известному содержанию, а также приведен расчет проницаемости смачивающего флюида.

1. Основная ветвь дренирования (ОВД^{aj})

Условия идентификации ОВД^{aj}

$$\theta_{j1} = \theta_s > \theta_{j2} > \dots > \theta_{jk} = \theta_{jr}, \text{ или} \quad (1.1)$$

$$\tilde{\theta}_{j1} = 1 > \tilde{\theta}_{j2} > \dots > \tilde{\theta}_{jk} = \tilde{\theta}_{jr} = \frac{\theta_{jr}}{\theta_{s,j}}, \text{ или} \quad (1.2)$$

$$h_{aj1} = 0 < h_{aj2} < \dots < h_{ajk} \rightarrow +\infty, \quad (1.3)$$

где $\theta_{j1} \dots \theta_{jk}$ – дискретные измерения содержания смачивающего флюида; $\tilde{\theta}_{j1} \dots \tilde{\theta}_{jk}$ – то же его насыщенности; $h_{aj1} \dots h_{ajk}$ – капиллярные напоры в системе «а – j»; θ_{jr} , $\tilde{\theta}_{jr}$ – наименьшее неустраняемое содержание и насыщенность остаточного смачивающего флюида в процессе дренирования.

Расчет ОВД^{aj}

I. Есть полный ряд дискретных измерений θ_j (1.1) и h_{aj} (1.3).

1. По аппроксимации рядов $h_{aj} - \theta_j$ уравнением van Genuchten (VG) [van Genuchten, 1980]:

$$\bar{\theta}_j = [1 + (\alpha_{aj} h_{aj}^d)^{\epsilon}]^{-d/m}, \quad (1.4)$$

где $\bar{\theta}_j = (\theta_j - \theta_{jr}) / (\theta_{s,j} - \theta_{jr})$; α_{aj} , ϵ , d , $m_{aj} = 1 - 1/d$ – параметры уравнения, которые определяются с помощью программы RETC, взятой из интернета (<http://www.ussl.arc.usda.gov/models>) и адаптированной к нашим требованиям.

2. По уравнению (1.4) и любому значению h_{aj} рассчитывается соответствующее ему значение $\bar{\theta}_j$, а

$$\theta_j = \bar{\theta}_j (\theta_{s,j} - \theta_{jr}) + \theta_{jr}. \quad (1.5)$$

3. По произвольному значению θ_j рассчитывается соответствующее ему значение h_{aj} по выражению, которое является решением уравнения (1.4):

$$h_{aj} = \frac{1}{\alpha_{aj}^d} \left[\left(\frac{1}{\bar{\theta}_j} \right)^{\frac{1}{d}} - 1 \right]^{\frac{1}{m_{aj}}}; \quad (1.6)$$

$$h_w = -h_{aw}, \text{ а } h_o = -\frac{h_{ao}}{\rho_o}, h_a = 0. \quad (1.7)$$

II. Если имеются неполные ряды дискретных измерений θ_j и h_{aj} : в рядах (1.1) и (1.3) отсутствуют первый и последний члены, то надо установить их принадлежность к ОВД^{aj}. Для этого необходимо иметь для данной литологической разности лабораторные определения α_{aj}^d , ϵ_{aj}^d .

По формуле (1.4) и h_{aj} рассчитывается θ_{ji}^c , которое сравнивается с θ_{ji} фактическим. Если $\theta_{ji}^c - \theta_{ji} \leq \pm 0,02$ (точности экспериментального измерения θ_j), то ряды h_{aj} и θ_j принадлежат к ОВД^{aj}.

III. Если есть неполный ряд только h_{aj} , то дополнительно необходимо иметь по крайней мере для одного h_{aj} экспериментальное значение θ_{ji} , по которому выполняется процедура II для установления принадлежности ряда h_{aj} к ОВД^{aj}; значение θ_j , соответствующее h_{aj} , рассчитывается по формуле (1.4).

IV. Если есть неполный ряд только θ_j , то дополнительно необходимо иметь по крайней мере для одного θ_{ji} экспериментальное значение h_{aj} , по которому выполняется процедура II для установления принадлежности θ_j к ОВД^{aj}. Если ряд θ_j относится к ОВД^{aj}, то по формуле (1.6) рассчитываются соответствующие значения h_{aj} .

V. Для расчета проницаемости смачивающего флюида (k) в легких грунтах применяется формула Y.A. Mualem [Mualem, 1976]:

$$k(\bar{\theta}_j) = k_{s,j} \bar{\theta}_j^\ell \left[1 - \left(1 - \bar{\theta}_j^{m_{aj}} \right)^2 \right], \quad (1.8)$$

где $\ell = 0,5$ для большинства песчаных и супесчаных грунтов; $k_{s,j}$ – коэффициент фильтрации смачивающего флюида.

В показателях капиллярного давления:

$$k(h_{aj}) = \frac{k_{s,j} \left\{ 1 - (\alpha_{aj} h_{aj})^{m_{aj}} \left[1 + (\alpha_{aj} h_{aj})^{\epsilon_{aj}} \right]^{-m_{aj}} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha_{aj} h_{aj})^{\epsilon_{aj}} \right]^{m_{aj}}}. \quad (1.9)$$

Для расчета проницаемости в тяжелых грунтах лучше применять формулы N.T. Burdine [Burdine, 1953]:

$$k(\bar{\theta}_j) = k_{s,j} \bar{\theta}_j^\ell \left[1 - \left(1 - \bar{\theta}_j^{m_{aj}} \right) \right]^2 \text{ при } \ell = 2, m_{aj} = 1 - \frac{2}{\varepsilon_{aj}}; \quad (1.10)$$

$$k(h_{aj}) = k_{s,j} \frac{\left\{ 1 - (\alpha_{aj} h_{aj})^{\varepsilon_{aj}-2} \left[1 + (\alpha_{aj} h_{aj})^\varepsilon \right]^{-m_{aj}} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha_{aj} h_{aj})^\varepsilon \right]^{m_{aj} \ell}}. \quad (1.11)$$

Входные данные для расчета

Ряды дискретных значений h_{aj} и/или θ_j , θ_s , θ_{jr} , $k_{s,j}$.

Кроме них, для процедур II-IV – ${}^d\alpha_{aj}$, ${}^d\varepsilon_{aj}$, h_{aj_i} (θ_{j_i}).

2. Основная ветвь впитывания (ОВВ^{aj})

Условия идентификации ОВВ^{aj}

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{j_1} = \theta_{jr} < \theta_{j_2} < \dots < \theta_{j_k} = \\ = {}^i\theta_j^m = \theta_{s,j} - \theta_{at}^m, \text{ или} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{\theta}_{j_1} = \tilde{\theta}_{jr} = \frac{\theta_{jr}}{\theta_{s,j}} < \tilde{\theta}_{j_2} \dots < \tilde{\theta}_{j_k} = \\ = {}^i\tilde{\theta}_j^m = 1 - \tilde{\theta}_{at}^m = 1 - \frac{\theta_{at}^m}{\theta_{s,j}}, \text{ или} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$+\infty > h_{aj_1} > h_{aj_2} > \dots > h_{aj_k} = 0. \quad (2.3)$$

Расчет ОВВ^{aj}

Аналогичный ОВД^{aj} (процедуры I-IV), за исключением того, что рассчитывается по формуле (VG), записанной для ОВВ^{aj}:

$$\bar{\theta}_j = \left[1 + \left({}^i\alpha_{aj} h_{aj} \right)^{\varepsilon_{aj}} \right]^{-i m_{aj}}, \quad (2.4)$$

где $\bar{\theta}_j = \frac{\theta_j - \theta_{jr}}{{}^i\theta_j^m - \theta_{jr}}$; $\theta_j = \bar{\theta}_j \left({}^i\theta_j^m - \theta_{jr} \right) + \theta_{jr}$;

${}^i\theta_j^m$ – максимальное содержание смачивающего флюида в процессе ОВВ^{aj}.

По данным θ_j определяется h_{aj} :

$$h_{aj} = \frac{1}{{}^i\alpha_{aj}} \left[\left(\frac{1}{\bar{\theta}_j} \right)^{\frac{1}{i m_{aj}}} - 1 \right]^{\frac{1}{\varepsilon_{aj}}}. \quad (2.5)$$

Напоры h_w , h_o , h_a рассчитываются по зависимости (1.7).

Проницаемость определяется по уравнению:

$$k(\theta_j) = k_{r,j} k_{s,j}, \quad (2.6)$$

где $k_{r,j}$ – относительная проницаемость смачивающего флюида; находится с использованием формулы R. J. Lenhard, J. C. Parker [Lenhard, Parker, 1987], которая является модифицированной моделью Y. A. Mualem с учетом гистерезиса в процессе впитывания, вызванного захватом воздуха смачивающим флюидом:

$$k_{r,j} = \bar{\theta}_j^2 \left[1 - \left(1 - \frac{\bar{\theta}_{at}^m}{1 - \tilde{\theta}_{jr}} \right) \left(1 - \bar{\theta}_j^{i m_{aj}} \right)^{i m_{aj}} - \frac{\bar{\theta}_{at}^m}{1 - \tilde{\theta}_{jr}} \left(1 - \tilde{\theta}_{jr}^{i m_{aj}} \right)^{i m_{aj}} \right]^2, \quad (2.7)$$

где $\bar{\theta}_{at}^m = 1 - \frac{{}^i\theta_j^m}{\theta_{s,j}}$, θ_{at}^m – максимальное содержание захваченного воздуха в процессе ОВВ^{aj}.

жание захваченного воздуха в процессе ОВВ^{aj}.

Входные данные для расчета

Ряды дискретных значений h_{aj} и/или θ_j , θ_s , θ_{jr} , ${}^i\theta_j^m$, $k_{s,j}$.

Для процедур II-IV – дополнительно ${}^i\alpha_{aj}$, ${}^i\varepsilon_{aj}$, h_{aj_i} (θ_{aj_i}).

3. Промежуточная ветвь впитывания (ПрВВ^{aj})

Условия идентификации ПрВВ^{aj}

$$\theta_{jr} < \Delta\theta_j < \theta_{j_2} < \dots < \theta_{j_k} > {}^i\theta_j^m, \text{ или} \quad (3.1)$$

$$\tilde{\theta}_{jr} < \Delta\tilde{\theta}_j < \tilde{\theta}_{j_2} < \dots < \tilde{\theta}_{j_k} > {}^i\tilde{\theta}_j^m, \text{ или} \quad (3.2)$$

$$+\infty > \Delta h_{aj} > h_{aj_1} > \dots > h_{aj_k} = 0, \quad (3.3)$$

где ($\Delta\theta_j$, Δh_{aj}) – содержание смачивающего флюида и капиллярный напор в поворотной точке с ОВД^{aj}.

Поворотная точка ($\Delta\theta_j$, Δh_{aj}) принадлежит к ОВД^{aj}, если

$$\theta_j^c(\Delta h_{aj}) = \left(\theta_{s,j} - \theta_{jr} \right) \left[1 + \left({}^d\alpha_{aj} \Delta h_{aj} \right)^{d\varepsilon_{aj}} \right]^{-d m_{aj}} + \theta_{jr}, \quad (3.4)$$

$$\theta_j^c(\Delta h_{aj}) - \Delta\theta_j \leq \pm 0,02.$$

Расчет ПрВВ^{aj}

I. Расчет θ_j по h_{aj}

Находятся текущая эффективная насыщенность (${}^{ic}\bar{\theta}_j(h_{aj})$) и текущее содержание смачивающего флюида (${}^{ic}\bar{\theta}_j$):

$${}^{ic}\bar{\theta}_j(h_{aj}) = \bar{\theta}_j(h_{aj}) - {}^{ic}\bar{\theta}_{at}, \quad {}^{ic}\theta(h_{aj}) = {}^{ic}\bar{\theta}(h_{aj})(\theta_{s,j} - \theta_{jr}) + \theta_{jr}, \quad (3.5)$$

где кажущаяся насыщенность $\bar{\theta}_j(h_{aj})$:

$$\bar{\theta}_j(h_{aj}) = \left[1 + ({}^i\alpha_{aj} h_{aj})^{i\varepsilon_{aj}} \right]^{-i m_{aj}}, \quad (3.6)$$

а эффективное насыщение текущего захваченного воздуха ${}^{ic}\bar{\theta}_j(h_{aj})$:

$${}^{ic}\bar{\theta}_{at} = {}^i\bar{\theta}_{at} \left(\frac{\bar{\theta}_j(h_{aj}) - \Delta\bar{\theta}_j}{1 - \Delta\bar{\theta}_j} \right), \quad (3.7)$$

где максимальная эффективная насыщенность захваченного воздуха в процессе ПрВВ^{aj} ${}^i\bar{\theta}_{at}$:

$${}^i\bar{\theta}_{at} = \frac{\Delta\bar{\theta}_j}{1 + R_{aj}(1 - \Delta\bar{\theta}_j)}, \quad (3.8)$$

а
$$\Delta\bar{\theta}_j = \frac{\Delta\theta_j - \theta_{jr}}{\theta_s - \theta_{jr}}; \quad R_{aj} = \frac{1}{\bar{\theta}_{at}^m} - 1;$$

$$\bar{\theta}_{at}^m = 1 - \frac{i\theta_j^m - \theta_{jr}}{\theta_s - \theta_{jr}}. \quad (3.9)$$

II. Расчет текущих значений h_{aj} по θ_j

Определяются:

1) эффективные насыщенности: $\Delta\bar{\theta}_j$, $\bar{\theta}_{at}^m$, ${}^i\bar{\theta}_{at}$ по формулам (3.8) и (3.9);

2) эффективная насыщенность расчетной точки θ_j : $\bar{\theta}_j = \frac{\theta_j - \theta_{jr}}{\theta_{s,j} - \theta_{jr}}$.

Составляется система уравнений:

$$\begin{cases} (3) \quad {}^{ic}\bar{\theta}_{at} \text{ по формуле (3.7);} \\ (4) \quad {}^{ic}\bar{\theta}_j(h_{aj}) = \bar{\theta}_j + {}^{ic}\bar{\theta}_{at}, \end{cases}$$

решением которых находится $\bar{\theta}_j(h_{aj})$.

$$5) \quad h_{aj} = \frac{1}{i\alpha_{aj}} \left[\left(\frac{1}{{}^{ic}\bar{\theta}_j} \right)^{\frac{1}{i m_{aj}}} - 1 \right]^{\frac{1}{i\varepsilon_{aj}}}. \quad (3.10)$$

Напоры h_w , h_o , h_a определяются по формуле (1.7).

III. Расчет проницаемости смачивающего флюида по формуле (2.6)

Относительная проницаемость $k_{r,j}$ смачивающего флюида находится по формуле R. J. Lenhard, J. C. Parker [Lenhard, Parker, 1987]:

$$k_{r,j} = \frac{1}{\bar{\theta}_j^2} \left[1 - \left(1 - \frac{{}^i\bar{\theta}_{at}}{1 - \Delta\bar{\theta}_j} \right) \left(1 - \bar{\theta}_j^{-i m_{aj}} \right) \right] - \frac{{}^i\bar{\theta}_{at}}{1 - \Delta\bar{\theta}_j} \left(1 - \Delta\bar{\theta}_j^{-i m_{aj}} \right)^2. \quad (3.11)$$

Входные данные для расчета

Ряды дискретных значений h_{aj} или θ_j , θ_s , θ_{jr} , $i\theta_j^m$, $k_{s,j}$, ${}^d\alpha_{aj}$, ${}^d\varepsilon_{aj}$, $i\alpha_{aj}$, $i\varepsilon_{aj}$, $\Delta\theta_j$, Δh_{aj} .

4. Произвольная ветвь дренирования (ПзВД^{aj})

Произвольная ветвь дренирования может выходить из ОВВ^{aj}, ПрВВ^{aj} и ПзВВ^{aj} (см. рисунок).

Условия идентификации ПзВД^{aj}

$$\Delta\theta_j^{id} > \theta_{j_2} > \dots > \theta_{j_k}, \quad \text{или} \quad (4.1)$$

$$\Delta\tilde{\theta}_j^{id} > \tilde{\theta}_{j_2} > \dots > \tilde{\theta}_{j_k} = \frac{\theta_{j_k}}{\theta_s}, \quad \text{или} \quad (4.2)$$

$$\Delta h_{aj} < h_{aj_2} < \dots < h_{aj_k}. \quad (4.3)$$

Расчет ПзВД^{aj}

I. Расчет θ_j по h_{aj}

1. Определяется кажущаяся насыщенность ($\bar{\theta}_j^d$), которая отвечает капиллярному напору h_{aj} , по уравнению R. J. Lenhard, J. C. Parker [Lenhard, Parker, 1987]:

$$\bar{\theta}_j^d(h_{aj}) = \frac{\left[\bar{\theta}_j^d(h_{aj}) - \bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di}) \right] \left[\Delta\bar{\theta}_{j,id} - \Delta\bar{\theta}_{j,di} \right]}{\bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,id}) - \bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di})} + \Delta\bar{\theta}_{j,di}, \quad (4.4)$$

где $\bar{\theta}_j^d(h_{aj})$, $\bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di})$, $\bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,id})$ находятся по формуле:

$$\bar{\theta}_j^d = \left[1 + ({}^d\alpha_{aj} h)^{d\varepsilon_{aj}} \right]^{-d m_{aj}}, \quad (4.5)$$

где $h = \{h_{aj}, \Delta h_{aj,di}, \Delta h_{aj,id}\}$; $\Delta h_{aj,di}$, $\Delta h_{aj,id}$ – капил-

лярный напор в соответствующих поворотных точках: di – от предыдущего процесса дренирования до процесса впитывания; id – от последнего процесса впитывания до процесса дренирования; $\bar{\theta}_{j,id}^{\Delta}$, $\bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}$ берутся из расчета соответственно предыдущей ветки впитывания и дренирования.

2. Находится эффективная насыщенность:

$$\bar{\theta}_j^d(h_{aj}) = \bar{\theta}_j^d(h_{aj}) - {}^{ic}\bar{\theta}_{at}^d, \quad (4.6)$$

где ${}^{ic}\bar{\theta}_{at}^d$ рассчитывается по формулам (3.7)–(3.9) при соответствующих $\bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}$.

3. Содержание смачивающего флюида определяется по зависимости:

$$\theta_j^d(h_{aj}) = \bar{\theta}_j^d(h_{aj})[\theta_{s,j} - \theta_{jr}] + \theta_{jr}. \quad (4.7)$$

II. Расчет значений h_{aj} по θ_j

1. Из формулы (4.4) находится $\bar{\theta}^d(h_{aj})$:

$$\bar{\theta}^d(h_{aj}) = \frac{[\bar{\theta}_j^d(h_{aj}) - \bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}][\bar{\theta}^d(\Delta h_{aj,id}) - \bar{\theta}^d(\Delta h_{aj,di})]}{\bar{\theta}_{j,id}^{\Delta} - \bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}} + \bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di}), \quad (4.8)$$

в которой:

а) $\bar{\theta}_j^d(h_{aj})$ определяется решением системы нижеследующих уравнений и подставляется в формулу (4.8).

$$\begin{cases} \bar{\theta}_j^d(h_{aj}) = \bar{\theta}_j + \bar{\theta}_{at}^d; \\ \bar{\theta}_{at}^d = \frac{\bar{\theta}_j^d(h_{aj}) - \bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}}{1 - \bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}} {}^{ic}\bar{\theta}_{at}^d, \end{cases}$$

где $\bar{\theta}_j = \frac{\theta_j - \theta_{jr}}{\theta_{s,j} - \theta_{jr}}$, $\bar{\theta}_{j,di}^{\Delta} = \frac{\Delta\theta_{j,di} - \theta_{jr}}{\theta_{s,j} - \theta_{jr}}$ или берется

из расчета предыдущей ветки дренирования, ${}^{ic}\bar{\theta}_{at}^d$ рассчитывается по формулам (3.8) и (3.9).

Если ПзВД^{aj} начинается с ОВВ^{aj}, то $\bar{\theta}_{j,di}^{\Delta} = 0$.

б) члены уравнения (4.8) $\bar{\theta}^d(\Delta h_{id})$ и $\bar{\theta}^d(\Delta h_{di})$ рассчитываются по формуле (4.5).

в) члены уравнения $\bar{\theta}_{j,id}^{\Delta}$, $\bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}$ берутся из расчета соответственно предыдущих веток впитывания и дренирования.

$$2. \quad h_{aj} = \frac{1}{d\alpha_{aj}} \left[\left(\frac{1}{\bar{\theta}_j^d(h_{aj})} \right)^{\frac{1}{d_{m_{aj}}}} - 1 \right]^{\frac{1}{d_{\varepsilon_{aj}}}}. \quad (4.9)$$

Напоры h_w , h_o , h_a определяются по формуле (1.7).

III. Проницаемость смачивающего флюида рассчитывается по зависимости (2.6), а относительная проницаемость – по уравнению (3.11), записанному для ПзВД^{aj}:

$$k_{r,j} = \bar{\theta}_j^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{{}^{i}\bar{\theta}_{at}}{1 - \bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}} \right) \left(1 - \bar{\theta}_j^d(h_{aj}) \right)^{\frac{1}{d_{m_{aj}}}} - \frac{{}^{i}\bar{\theta}_{at}}{1 - \bar{\theta}_{j,di}^{\Delta}} \left(1 - \bar{\theta}_{j,di}^{\Delta} \right)^{\frac{1}{d_{m_{aj}}}} \right]^2. \quad (4.10)$$

Входные данные для расчета

Если ПзВД^{aj} начинается с ОВВ^{aj}, то вместо ${}^{i}\bar{\theta}_{at}$ подставляется $\bar{\theta}_{at}^m$.

Ряды дискретных значений

$$h_{aj} \text{ или } \theta_j, \theta_s, \theta_{jr}, {}^i\theta_j^m, k_{s,j}, d^{\alpha}, d^{\varepsilon}, {}^i\alpha, {}^i\varepsilon, (\Delta\theta_{j,id}, \Delta h_{aj,id}), (\Delta\theta_{j,di}, \Delta h_{aj,di}).$$

5. Произвольная ветвь впитывания (ПзВВ^{aj})

Произвольная ветвь впитывания может начинаться только с ПзВД^{aj} (см. рисунок).

Условия идентификации ПзВВ^{aj}

$$\Delta\theta_{j,di} < \theta_{j2} \dots < \theta_{jk}, \text{ или} \quad (5.1)$$

$$\Delta\tilde{\theta}_{j,di} < \tilde{\theta}_{j2} \dots < \tilde{\theta}_{jk} = \frac{\theta_{jk}}{\theta_{s,j}}, \text{ или} \quad (5.2)$$

$$\Delta h_{aj,dj} > h_{aj2} > \dots > h_{ajk} \rightarrow 0. \quad (5.3)$$

Поворотная точка $(\Delta\theta_{j,di}, \Delta h_{aj,di})$ не принадлежит к ОВД^{aj}, что проверяется таким образом:

$$\bar{\theta}_j^c(\Delta h_{aj,di}) = \left[1 + (d\alpha_{aj} \Delta h_{aj,di})^{d_{\varepsilon_{aj}}} \right]^{-d_{m_{aj}}};$$

$$\theta_j^c(\Delta h_{aj,di}) = \bar{\theta}_j^c(\Delta h_{aj,di})[\theta_{s,j} - \theta_{jr}] + \theta_{jr}; \quad (5.4)$$

$$\theta_{j,di}^c - \Delta\theta_j < 0,02.$$

Расчет ПзВВ^{aj}

I. Расчет θ_j по h_{aj}

1. Определяется кажущаяся насыщенность $\bar{\theta}_j^i$, которая отвечает капиллярному напору h_{aj} по формуле, похожей на уравнение (4.4).

$$\bar{\theta}_j^i(h_{aj}) = \frac{[\bar{\theta}_j^d(h_{aj}) - \bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,id})][\bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di}) - \bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di})]}{\bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di}) - \bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,id})} + \bar{\theta}_j^d(\Delta h_{aj,di}), \quad (5.5)$$

где $\bar{\theta}_j(h_{aj}), \bar{\theta}_j(\Delta h_{aj,di}), \bar{\theta}_j(\Delta h_{aj,id})$ находятся так:

$$\bar{\theta}_j^i = \left[1 + \left(\alpha_{aj}^i h \right)^{\epsilon_{aj}^i} \right]^{-i m_{aj}}, \quad (5.6)$$

где $h = \{h_{aj}, \Delta h_{aj,di}, \Delta h_{aj,id}\}$; $\Delta \bar{\theta}_{j,di}$ и $\Delta \bar{\theta}_{j,id}$ берутся из расчета соответственно предыдущей ветки дренирования и впитывания.

2. Находится эффективная насыщенность:

$$\bar{\theta}_j^i(h_{aj}) = \bar{\theta}_j^i(h_{aj}) - \bar{\theta}_{at}^i, \quad (5.7)$$

где $\bar{\theta}_{at}^i$ рассчитывается по формулам (3.7)–(3.9) при $\Delta \theta_{j,di}$.

3. Содержание смачивающего флюида определяется по уравнению:

$$\theta_j^i(h_{aj}) = \bar{\theta}_j^i(h_{aj})(\theta_{s,j} - \theta_{jr}) + \theta_{jr}. \quad (5.8)$$

II. Расчет значений h_{aj} по θ_j

1. Из формулы (5.5) находится:

$$\bar{\theta}_j^i(h_{aj}) = \frac{\left[\bar{\theta}_j^i(h_{aj}) - \Delta \bar{\theta}_{j,id} \right] \left[\bar{\theta}_j^i(\Delta h_{aj,di}) - \bar{\theta}_j^i(\Delta h_{aj,id}) \right]}{\Delta \bar{\theta}_{j,di} - \Delta \bar{\theta}_{j,id}} + \bar{\theta}_j^i(\Delta h_{aj,id}), \quad (5.9)$$

в которой:

а) $\bar{\theta}_j^i(h_{aj})$ определяется решением системы нижеследующих уравнений и подставляется в формулу (5.9)

$$\begin{cases} \bar{\theta}_j^i(h_{aj}) = \bar{\theta}_j + \bar{\theta}_{at}; \\ \bar{\theta}_{at} = \frac{\bar{\theta}_j^i(h_{aj}) - \Delta \bar{\theta}_{j,di}}{1 - \Delta \bar{\theta}_{j,di}} \bar{\theta}_{at}, \end{cases}$$

где $\bar{\theta}_j = \frac{\theta_j - \theta_{jr}}{\theta_{s,j} - \theta_{jr}}$, $\Delta \bar{\theta}_{j,di} = \frac{\Delta \theta_{j,di} - \theta_{jr}}{\theta_{s,j} - \theta_{jr}}$ или берется из расчета предыдущей ветки дренирования.

$\bar{\theta}_{at}$ рассчитывается по формулам (3.8) и (3.9).

б) члены уравнения $\Delta \bar{\theta}_{j,di}$, $\Delta \bar{\theta}_{j,id}$ определяются расчетом соответственно предыдущих веток дренирования и впитывания, а $\bar{\theta}_j^i(\Delta h_{aj,di})$ и $\bar{\theta}_j^i(\Delta h_{aj,id})$ находятся по зависимости (5.6).

$$2. \quad h_{aj} = \frac{1}{\alpha_{aj}^i} \left[\left(\frac{1}{\bar{\theta}_j^i(h_{aj})} \right)^{\frac{1}{i m_{aj}}} - 1 \right]^{\frac{1}{\epsilon_{aj}^i}}. \quad (5.10)$$

Напоры h_w, h_o, h_a определяются по формуле (1.7).

III. Проницаемость смачивающего флюида рассчитывается по уравнению (2.6), а относительная проницаемость – аналогично формуле (4.10), подставлением в нее параметров, которые рассчитываются для ПзВВ^{aj} в процедурах I, II.

Входные данные для расчета

Ряды дискретных значений

h_{aj} или $\theta_j, \theta_s, \theta_{ir}, \theta_j^m, k_{sj}, d\alpha, d\epsilon, i\alpha, i\epsilon, (\Delta \theta_{j,di} \Delta h_{aj,di}), (\Delta \theta_{j,id} \Delta h_{aj,id})$.

6. Порядок расчета рядов измерений h_{aj} и θ_j

1. Ряд измерений разбивается на пути насыщения (дренирование и впитывание) по изменениям в значениях h_{aj} и θ_j : h_{aj} увеличивается, θ_j уменьшается – путь дренирования; h_{aj} уменьшается, θ_j увеличивается – путь впитывания.

2. Устанавливается по условиям идентификации принадлежность первого пути насыщения к соответствующей ветке, по которой производится расчет.

3. Расчет второй и других веток выполняется в последовательности:

ОВД^{aj} – /ПрВВ^{aj} – ПзВД^{aj} – ПзВВ^{aj} – ПзВД^{aj} и т.п.
 \ОВВ^{aj} – ПзВД^{aj} – ПзВВ^{aj} – ПзВД^{aj} и т.п.

Выводы

На основании основополагающих уравнений R.J. Lenhard, J.C. Parker [Lenhard, Parker, 1987] разработана теоретическая база расчета каждого из путей впитывания и дренирования двухфлюидной системы «воздух – смачивающий флюид» (ОВД, ОВВ, ПрВВ, ПзВД, ПзВВ), которые могут формироваться в процессе колебания УГВ. Для каждой ветви приведены ее идентификация, расчет содержания смачивающего флюида по известным капиллярным напорам, расчет капиллярного напора и напоров флюидов (w, o, a) по известному содержанию смачивающего флюида, а также расчет его проницаемости.

Данные расчеты могут применяться для определения количества и распределения содержания смачивающего флюида (w, o) в ГС, прогноза их изменения в процессе колебания УГВ, а также для расчета скорости пространственного перемещения смачивающего флюида.

Список литературы / References

1. Огняник Н.С. Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова, А.Л. Брикс, Р.Б. Гаврилюк. – Киев: LAT & K, 2013. – 254 с.
Ognianik N.S., Paramonova N.K., Bricks A.L., Gavryliuk R.B., 2013. Ecological and hydrogeological monitoring of subsurface contamination areas with light petroleum products. Kiev: LAT & K, 254 p. (in Russian).
2. Огняник Н.С. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова, А.Л. Брикс, И.С. Пашковский, Д.В. Коннов. – Киев: А. П. Н., 2006. – 278 с.
Ognianik 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).
3. Парамонова Н.К. Расчет распределения мобильных и удерживаемых легких нефтепродуктов в линзе, сформировавшейся на грунтовых водах / Н.К. Парамонова // Геол. журн. – 2003. – № 3 (304). – С. 69–76.
Paramonova N.K., 2003. Estimation of mobile and retained light hydrocarbon distribution in a lens on groundwater table. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (304), p. 69–76 (in Russian).
4. Burdine N.T. Relative permeability calculations from pore size distribution data / N.T. Burdine // Trans. AIME. – 1953. – Vol. 198. – P. 71–77.
Burdine N.T., 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Trans. AIME*, vol. 198, p. 71–77 (in English).
5. CONCAWE. Protection of ground water from oil pollution. / CONCAWE Report – Den Haag // Water pollution special task force. – 1979. – Vol. 1. – 61 p.
CONCAWE, 1979. Protection of ground water from oil pollution. CONCAWE Report. Den Haag. *Water pollution special task force*, vol. 1, 61 p. (in English).
6. Farr A.M. Volume estimation of light nonaqueous phase liquids in porous media / A.M. Farr, R.J. Houghtalen, D.B. McWhorter // *Ground Water*. – 1990. – Vol. 28 (1). – P. 48–56.
Farr A.M., Houghtalen R.J., McWhorter Volume D.B., 1990. Volume estimation of light nonaqueous phase liquids in porous media. *Ground Water*, vol. 28 (1), p. 48–56 (in English).
7. Hall R.A. Determination of hydrocarbon thickness in sediments using borehole data. *Proc. of Fourth National Symposium on Aquifer restoration and Groundwater Monitoring* / R.A. Hall, S.B. Blake, S.C. Champlin. – Worthington, OH: NWWA, 1984. – P. 300–304.
Hall R.A., Blake S.B., Champlin S.C., 1984. Determination of hydrocarbon thickness in sediments using borehole data. *Proc. of Fourth National Symposium on Aquifer restoration and Groundwater Monitoring*. Worthington, OH: NWWA, p. 300–304 (in English).
8. Hampton D.R. Laboratory investigation of the relationship between actual and apparent product thickness in sands. *Proc. 4th Natl. Outdoor Action Conf. on Aquifer Restoration, Ground Water Monitorings and Geophysical Methods* / D.R. Hampton, P.D.G. Miller. – Las Vegas, NV, 1990. – P. 127–142.
Hampton D.R., Miller P.D.G., 1990. Laboratory investigation of the relationship between actual and apparent product thickness in sands. *Proc. 4th Natl. Outdoor Action Conf. on Aquifer Restoration, Ground Water Monitorings and Geophysical Methods*. Las Vegas, NV, p. 127–142 (in English).
9. Lenhard R.J. Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells / R.J. Lenhard, J.C. Parker // *Ground Water*. – 1990. – Vol. 28 (1). – P. 57–67.
Lenhard R.J., Parker J.C., 1990. Estimation of free hydrocarbon volume from fluid levels in monitoring wells. *Ground Water*, vol. 28 (1), p. 57–67 (in English).
10. Lenhard R.J. A model for hysteretic constitutive relations governing multiphase flow / R.J. Lenhard, J.C. Parker // *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. 2187–2206 (in English).
11. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media / Y. Mualem // *Water Resour. Res.* – 1976. – Vol. 12. – P. 513–522.
Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, vol. 12, p. 513–522 (in English).
12. Van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils / M.T. Van Genuchten // *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).

Статья поступила
23.02.2016