

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

Статья 2. Теоретическая база расчета двухфлюидной системы  
«легкие нефтепродукты – вода» в пористой среде

**Н.С. Огняник<sup>1</sup>, Н.К. Парамонова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Доктор геолого-минералогических наук, профессор.*

<sup>2</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.*

На основе параметрической модели R.J. Lenhard, M. Oostrom [Lenhard, Oostrom, 1998] для прогноза зависимости «проницаемость – насыщенность – капиллярный напор» для системы «легкие нефтепродукты – вода» в пористой среде со смешанной смачиваемостью разработана теоретическая база расчета всех возможных путей дренирования и впитывания, формирующихся при трансформации слоя с мобильными легкими нефтепродуктами в процессе колебания уровня грунтовых вод.

*Ключевые слова:* двухфлюидная система «легкие нефтепродукты – вода», мобильный легкий нефтепродукт, содержание, капиллярный напор, проницаемость.

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

Paper 2. Theoretical foundation for calculation  
“light petroleum products – water” two-phase systems in porous media

**N.S. Ognianik<sup>1</sup>, N.K. Paramonova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Doctor of geological sciences, professor.*

<sup>2</sup> *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 base of the parametric models [Lenhard, Oostrom, 1998] for predicting “relative permeability – saturation – capillary pressure” relationship of “light petroleum products – water” system in porous media with mixed wettability theoretical foundation for calculation of all possible saturation pathes is developed. Drainage and imbibition pathes are formed in “light petroleum products – water” porous media systems at ground water fluctuation.

*Key words:* two-phase system “light petroleum products – water”, mobile light petroleum products, content, capillary head, permeability.

© Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова, 2016

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

Стаття 2. Теоретична база розрахунку двофлюїдної системи  
«легкі нафтопродукти – вода» у пористому середовищі

**М.С. Огняник<sup>1</sup>, Н.К. Парамонова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Доктор геолого-мінералогічних наук, професор.

<sup>2</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник.

На основі параметричної моделі R.J. Lenhard and M. Oostrom [Lenhard, Oostrom, 1998] для прогнозу залежності «проникність – насиченість – капілярний напір» для системи «легкі нафтопродукти – вода» в пористому середовищі зі змішаною змочуваністю розроблено теоретичну базу розрахунку всіх можливих шляхів дренавання і убирання, що формуються під час трансформації шару з мобільними легкими нафтопродуктами у процесі коливання рівня ґрунтових вод.

*Ключові слова:* двофлюїдна система «легкі нафтопродукти – вода», мобільний легкий нафтопродукт, вміст, капілярний напір, проникність.

## Введение

Двухфлюидная система «легкие нефтепродукты – вода» («o – w») формируется в насыщенной пористой среде с мобильными легкими нефтепродуктами (ЛНП). В процессе колебания уровня грунтовых вод (УГВ) происходит взаимное вытеснение несмешивающихся жидкостей (воды и ЛНП), что приводит к состоянию смешанной смоченности пористой среды.

До начала процесса загрязнения все поры смочены водой. Как только ЛНП вытесняют воду из пор, они становятся смоченными ЛНП. Вода остается смачивающей жидкостью в порах, из которых она не вытеснена ЛНП, и становится несмачивающей в порах, из которых она вытеснена. Поэтому пористую среду с разными характеристиками смачивания называют *средой со смешанной пористостью*.

Параметрические модели для прогнозирования зависимости «проницаемость – насыщенность – капиллярный напір» для систем со смешанной моченностью разработаны R.J. Lenhard, M. Oostrom [Lenhard, Oostrom, 1998], в русскоязычном изложении они приведены в монографии [Огняник и др., 2006]. Эти модели служат основой для расчета всех формирующихся при колебании УГВ ветвей дренарования и впитывания

воды, которые показаны на рис. 1–3: основная ветвь дренарования (ОВД<sup>ow</sup>, рис. 1–3), основная ветвь впитывания (ОВВ<sup>ow</sup>, рис. 1–3), промежуточная ветвь впитывания (ПрВВ<sup>ow</sup>, рис. 2, 3), первичная ветвь дренарования (ПВД<sup>ow</sup>, рис. 2, 3), промежуточная ветвь дренарования (ПрВД<sup>ow</sup>, рис. 2, 3), произвольная ветвь дренарования (ПзВД<sup>ow</sup>, рис. 3), произвольная ветвь впитывания (ПзВВ<sup>ow</sup>, рис. 3).

В модели используется концепция кажущейся насыщенности, которая характеризует объем непрерывной фазы жидкости, включающей объем защемленной (прерывистой) жидкости. Понятие кажущейся насыщенности используется для того, чтобы отметить расположение поверхности раздела непрерывных фаз. Кажущаяся водная насыщенность  $\bar{\theta}_w$  определяется так:

$$\bar{\theta}_w = \frac{\theta_{wc} - \theta_{wr}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}} = \frac{\tilde{\theta}_{wc} - \tilde{\theta}_{wr}}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}}, \quad (B.1)$$

где  $\theta_s$  – полное объемное содержание жидкости;  $\theta_{wc}$ ,  $\tilde{\theta}_{wc} = \frac{\theta_{wc}}{\theta_s}$  – объемное содержание\* и насыщенность непрерывной водной фазы;  $\theta_{wr}$ ,  $\tilde{\theta}_{wr}$  – содержание и насыщенность остаточной воды;  $\theta_{ot}$ ,  $\tilde{\theta}_{ot}$  – содержание и насыщенность защемленного ЛНП.

\* В дальнейшем употребляется просто «содержание».

Кажущаяся насыщенность ЛНП составляет:

$$\bar{\theta}_o = \frac{\theta_{oc} + \theta_{wt} - \theta_{ot}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}} = \frac{\tilde{\theta}_{oc} + \tilde{\theta}_{wt} - \tilde{\theta}_{ot}}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}}, \quad (B.2)$$

где  $\theta_{oc}$ ,  $\tilde{\theta}_{oc} = \frac{\theta_{oc}}{\theta_s}$  – соответственно содержание и насыщенность непрерывной фазы ЛНП.

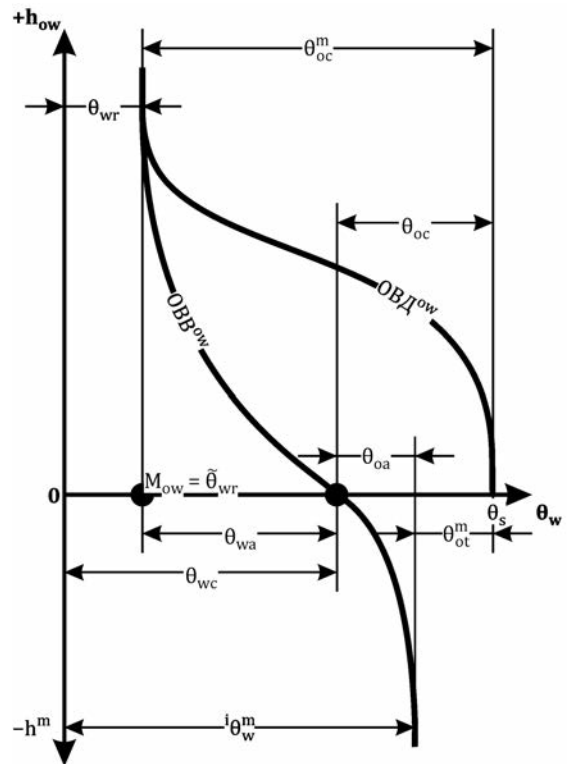
Из формул (B.1) и (B.2) вытекают условия системы «о – w»:

$$\theta_o + \theta_w = \theta_s; \quad \tilde{\theta}_o + \tilde{\theta}_w = 1; \quad \bar{\theta}_o + \bar{\theta}_w = 1. \quad (B.3)$$

Кажущиеся насыщенности воды и ЛНП изменяются от 0 до 1. Кажущаяся насыщенность воды приближается к нулю по мере того, как  $\theta_{wc}$  стремится к  $\theta_{wr}$ . Кажущаяся насыщенность ЛНП приближается к нулю по мере того, как  $\theta_{oc}$  стремится к  $\theta_{ot}$ .

Ниже для каждой ветви приведены условия ее идентификации, расчет содержания воды ( $\theta_w$ ) и ЛНП ( $\theta_o$ ) по известному ряду капиллярных напоров ( $h_{ow}$ ), расчет капиллярных напоров по известному содержанию  $\theta_w$  или  $\theta_o$ , а также расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ ).

**1. Основная ветвь дренирования (ОВД<sup>ow</sup>)**  
ОВД<sup>ow</sup> начинается с  $\theta_w = \theta_s$  и заканчивается при  $\theta_w = \theta_{wr}$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Зависимости  $\theta_w(h_{ow})$ , указывающие на основную ветвь дренирования (ОВД<sup>ow</sup>) и основную ветвь впитывания (ОВВ<sup>ow</sup>)

**Fig. 1.**  $\theta_w(h_{ow})$  relationships main drainage (ОВД<sup>ow</sup>) and main imbibition (ОВВ<sup>ow</sup>) curves

**Условия идентификации ОВД<sup>ow</sup>**

$$\theta_{w1} = \theta_s > \theta_{w2} \dots > \theta_{wk} = \theta_{wr} \quad \text{и} \quad (1.1)$$

$$\theta_{o1} = 0 < \theta_{o2} = \theta_s - \theta_{w2} < \dots < \theta_{ok} = \theta_s - \theta_{wk} = \theta_{oc}^m = \theta_s - \theta_{wr}, \quad \text{или} \quad (1.2)$$

$$\tilde{\theta}_{w1} = 1 > \tilde{\theta}_{w2} > \dots > \tilde{\theta}_{wk} = \tilde{\theta}_{wr} \quad \text{и} \quad (1.3)$$

$$\tilde{\theta}_{o1} = 0 < \tilde{\theta}_{o2} = 1 - \tilde{\theta}_{w2} < \dots < \tilde{\theta}_{ok} = 1 - \tilde{\theta}_{wk} = \tilde{\theta}_{oc}^m = 1 - \tilde{\theta}_{wr}, \quad \text{или} \quad (1.4)$$

$$h_{ow1} = 0 < h_{ow2} < \dots < h_{owk} \rightarrow +\infty \text{ при } \theta_{wr}. \quad (1.5)$$

**Расчет ОВД<sup>ow</sup>**

I. Есть полные ряды  $\theta_w$  и соответствующие им значения  $h_{ow}$

$$\theta_{w1} = \theta_s > \theta_{w2} > \dots > \theta_{wk} = \theta_{wr}; \quad h_{ow1} = 0 < h_{ow2} < \dots < h_{owk} \rightarrow +\infty.$$

1. Аппроксимацией рядов  $h_{ow} - \theta_w$  функцией VG с помощью программы RETC определяются параметры  ${}^d\alpha_{ow}$  и  ${}^d\varepsilon_{ow}$ .

2. По функции VG

$$\bar{\theta}_w = \left[ 1 + ({}^d\alpha_{ow} h_{ow})^{d\varepsilon_{ow}} \right]^{-d m_{ow}} \quad (1.6)$$

при известных  ${}^d\alpha_{ow}$  и  ${}^d\varepsilon_{ow}$  рассчитывается по любому значению  $h_{ow}$  соответствующее ему значение  $\theta_w$ :

$$\theta_w = \bar{\theta}_w (\theta_s - \theta_{wr}) + \theta_{wr}; \quad \theta_o = \theta_s - \theta_w. \quad (1.7)$$

3. По произвольным значениям  $\theta_w$  находятся соответствующие значения  $h_{ow}$  по формуле:

$$h_{ow} = \frac{1}{d \alpha_{ow}} \left[ \left( \frac{1}{\bar{\theta}_w} \right)^{\frac{1}{d m_{ow}}} - 1 \right]^{\frac{1}{d \varepsilon_{ow}}} \quad h_w = -h_{ow}, \quad h_o = 0, \quad (1.8)$$

где  $\bar{\theta}_w = \frac{\theta_w - \theta_{wr}}{\theta_s - \theta_{wr}}$ .

II. Есть неполный ряд  $h_{ow}$ .

Необходимо установить его принадлежность к ОВД<sup>ow</sup>. Для этого надо иметь лабораторные определения  ${}^d\alpha_{ow}$  и  ${}^d\varepsilon_{ow}$ , а также хотя бы для одной точки измерения  $h_{ow} - \theta_w$ . Тогда по формулам (1.6)–(1.7) для этой точки рассчитывается по  $h_{ow}$  значение  $\theta_w^c$ , которое сравнивается с фактическим. Если  $\theta_w^c - \theta_w \leq \pm 0,02$ , то ряд принадлежит к ОВД, и по уравнениям (1.6)–(1.7) можно рассчитывать значения  $\theta_w$  и  $\theta_o$  для других измерений.

III. Есть неполный ряд  $\theta_w$ .

Надо иметь хотя бы для одной точки соответствующее значение  $h_{ow}$  и лабораторные определения  ${}^d\alpha_{ow}$  и  ${}^d\varepsilon_{ow}$ . По формуле (1.8) рассчитывается  $h_{ow}^c$ , которое сравнивается с  $h_{ow}$  экспериментальным. Если  $h_{ow}^c - h_{ow} \leq \pm 2$  см, то ряд  $\theta_w$  принадлежит к ОВД<sup>ow</sup>, и другие значения  $h_{ow}$ , отвечающие ряду  $\theta_w$ , рассчитываются по формуле (1.8).

IV. Расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ ):

$$k_w = k_{r,w} k_{s,w}; \quad (1.9)$$

$$k_o = k_{r,o} k_{s,o}, \quad (1.10)$$

где  $k_{s,w}$  и  $k_{s,o}$  – коэффициенты фильтрации воды и ЛНП.

$$k_{r,w} = \tilde{\theta}_{wa} \bar{\theta}_w^\chi, \quad (1.11)$$

а  $\tilde{\theta}_{wa} = \frac{\theta_w - \theta_{wr}}{\theta_s - \theta_{wr}}; \quad \chi = \frac{2 + \lambda}{\lambda},$

$$\lambda = \frac{{}^d m (1 - 0,5^{\frac{1}{d m}})}{1 - {}^d m}, \quad {}^d m = 1 - \frac{1}{{}^d \varepsilon_{ow}}; \quad (1.12)$$

$$k_{r,o} = \tilde{\theta}_{oa} [1 - \bar{\theta}_w^\chi], \quad \text{а } \tilde{\theta}_{oa} = 1 - \tilde{\theta}_w - \tilde{\theta}_{ot}^m. \quad (1.13)$$

### Входные данные для расчета

Ряды дискретных значений  $h_{ow}$  и/или  $\theta_w, \theta_s, \theta_{wr}, k_{s,w}, k_{s,o}$  (или  $v_w, v_o$ ); тогда  $k_{s,o} = \frac{k_{s,w} v_w}{v_o}$ , где  $v_w$  и  $v_o$  – кинематическая вязкость воды и ЛНП.

Дополнительно для процедур II–III —  ${}^d\alpha_{ow}, {}^d\varepsilon_{ow}, h_{ow}(\theta_w)$ .

## 2. Основная ветвь впитывания (ОВВ<sup>ow</sup>)

ОВВ<sup>ow</sup> начинается с  $\theta_w = \theta_{wr}$  при  $h_{ow} \rightarrow +\infty$  и заканчивается при  $\theta_w = \theta_w^m$ , если  $h_{ow} \rightarrow -\infty$  (рис. 1).

### Условия идентификации ОВВ<sup>ow</sup>

$$\theta_{wr} = \theta_{w1} < \theta_{w2} < \dots < \theta_{wk} = \theta_w^m = \theta_s - \theta_{ot}^m, \quad \text{или} \quad (2.1)$$

$$\tilde{\theta}_{wr} = \frac{\theta_{wr}}{\theta_s} = \tilde{\theta}_{w1} < \tilde{\theta}_{w2} < \dots < \tilde{\theta}_{wk} = \tilde{\theta}_w^m = \frac{\theta_w^m}{\theta_s} = 1 - \tilde{\theta}_{ot}^m, \quad \text{или} \quad (2.2)$$

$$\theta_{oc}^m = \theta_s - \theta_{wr} > \theta_{o1} = \theta_s - \theta_{w1} > \theta_{o2} = \theta_s - \theta_{w2} > \dots > \theta_{ok} = \theta_{ot}^m = \theta_s - \theta_w^m, \quad \text{или} \quad (2.3)$$

$$\tilde{\theta}_{oc}^m = 1 - \tilde{\theta}_{wr} > \tilde{\theta}_{o1} > \tilde{\theta}_{o2} = 1 - \tilde{\theta}_{w2} > \dots > \tilde{\theta}_{ok} = \tilde{\theta}_{ot}^m = 1 - \tilde{\theta}_w^m, \quad \text{или} \quad (2.4)$$

$$+\infty > h_{ow1} > h_{ow2} > \dots > 0 > h_{owk} = -h^m > -\infty \quad \text{при } \theta_{ot}^m. \quad (2.5)$$

### Расчет ОВВ<sup>ow</sup>

I. Определяется принадлежность рядов  $\theta_w$  и  $h_{ow}$  к ОВВ<sup>ow</sup>.

1. Если есть полные ряды  $h_{ow}$  и  $\theta_w$  по условиям определения ОВВ<sup>ow</sup> (2.1)–(2.5), то с использованием программы RETC находятся параметры  ${}^i\alpha_{ow}$  и  ${}^i\varepsilon_{ow}$  и по изложенным ниже процедурам II и III рассчитываются  $\theta_w$  и  $\theta_o$  по произвольным известным  $h_{ow}$ , а значения  $h_{ow}$  определяются по известным  $\theta_w$  или  $\theta_o$ .

2. Если есть неполный ряд  $\theta_w$  или  $h_{ow}$ , то необходимо иметь экспериментальные определения  $i\alpha_{ow}$  и  $i\varepsilon_{ow}$  и хотя бы для одной точки значения  $h_{ow}(\theta_w)$ . В этой точке по процедуре II рассчитываются  $\theta_w^c$  по  $h_{ow}$  или  $h_{ow}^c$  по  $\theta_w$  – по процедуре III, сравниваются  $\theta_w^c$  и  $h_{ow}^c$  с экспериментальными  $\theta_w$  и  $h_{ow}$ . Если выполняются условия  $\theta_w^c - \theta_w \leq \pm 0,02$  или  $h_{ow}^c - h_{ow} \leq \pm 2$  см, то точка находится на  $ОВВ^{ow}$ . Если эти условия не выполняются, то ряд анализируется на принадлежность к  $ПрВВ^{ow}$  или  $ПзВВ^{ow}$ .

II. Расчет  $\theta_w$  и  $\theta_o$  по  $h_{ow}$

$$\bar{\theta}_w = \left[ 1 + \left\{ i\alpha_{ow} (h_{ow} - h^m) \right\}^{i\varepsilon_{ow}} \right]^{i m_{ow}} ; \quad (2.6)$$

$$\tilde{\theta}_w = \bar{\theta}_w (1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}^m) + \tilde{\theta}_{wr} ; \quad (2.7)$$

$$\theta_w = \tilde{\theta}_w \theta_s ; \quad (2.8)$$

$$\theta_o = \theta_s - \theta_w . \quad (2.9)$$

III. Расчет  $h_{ow}$  по  $\theta_w$

Если задан ряд  $\theta_o$ , то он переводится в ряд  $\theta_w = \theta_s - \theta_o$ .

$$\bar{\theta}_w = \frac{\theta_w - \theta_{wr}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}^m} ; \quad (2.10)$$

$$h_{ow} = \frac{1}{i\alpha_{ow}} \left[ \left( \frac{1}{\bar{\theta}_w} \right)^{\frac{1}{i m_{ow}}} - 1 \right]^{i\varepsilon_{ow}} + h^m ; \quad (2.11)$$

$$h_w = -h_{ow} ; \quad h_o = 0 . \quad (2.12)$$

IV. Расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ )

$$1. \quad \tilde{\theta}_{wa} = \tilde{\theta}_w - \tilde{\theta}_{wr} ; \quad \tilde{\theta}_{oa} = \tilde{\theta}_o - \tilde{\theta}_{ot}^m . \quad (2.13)$$

2.  $k_w$  и  $k_o$  рассчитываются по формулам (1.9)–(1.13).

### 3. Промежуточная ветвь впитывания (ПрВВ<sup>ow</sup>)

ПрВВ<sup>ow</sup> (рис. 2) начинается с произвольной поворотной точки  $\Delta h_{ow,di} \Delta \theta_{w,di}$  на ОВД<sup>ow</sup>.

#### Условия идентификации ПрВВ<sup>ow</sup>

$$\theta_{wr} < \Delta \theta_{w,di} < \theta_{w_2} < \dots < \theta_{w_k} \leq i\theta_w^{np} > i\theta_w^m , \quad \text{или} \quad (3.1)$$

$$\theta_{oc}^m = (\theta_s - \theta_{wr}) > \Delta \theta_{o,di} = \theta_s - \Delta \theta_{w,di} > \theta_{o_2} = \theta_s - \theta_{w_2} > \dots > \theta_{o_k} = (\theta_s - \theta_{w_k}) \geq \theta_{ot}^{np} < \theta_{ot}^m , \quad \text{или} \quad (3.2)$$

$$+\infty > \Delta h_{ow,di} > h_{ow_2} > \dots > 0 > h_{ow_k} > h_{ow}^{np} > h^m ; \quad (3.3)$$

### Входные данные для расчета

Ряды дискретных значений  $h_{ow}$  и/или  $\theta_w, \theta_s, \theta_{wr}, \theta_{ot}^m, h^m, k_{s,w}, k_{s,o}$  (или  $v_w, v_o$ ).

Дополнительно для неполных рядов –  $i\alpha_{ow}, i\varepsilon_{ow}, h_{ow}(\theta_w)$ .

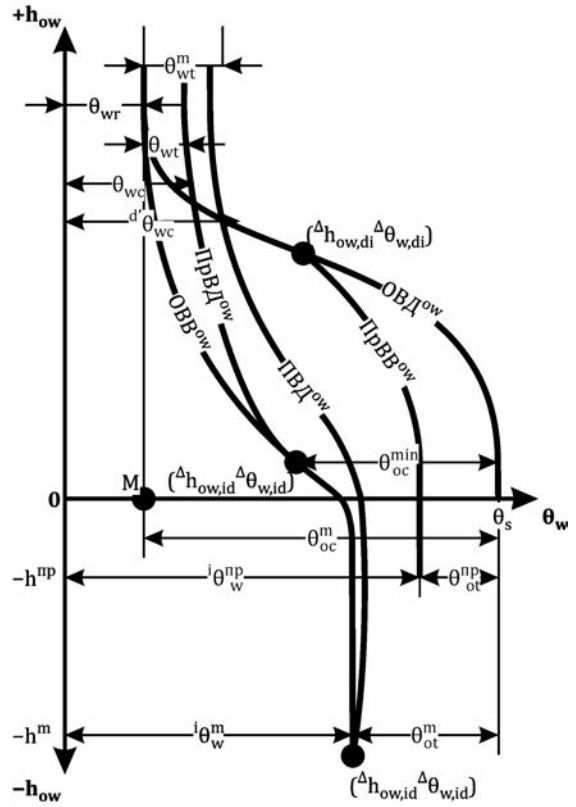


Рис. 2. Зависимости  $\theta_w(h_{ow})$ , указывающие на основную ветвь дренирования (ОВД<sup>ow</sup>), основную ветвь впитывания (ОВВ<sup>ow</sup>), первичную ветвь дренирования (ПВД<sup>ow</sup>), промежуточную ветвь впитывания (ПрВВ<sup>ow</sup>) и промежуточную ветвь дренирования (ПрВД<sup>ow</sup>)

Fig. 2.  $\theta_w(h_{ow})$  relationships main drainage (ОВД<sup>ow</sup>), main imbibition (ОВВ<sup>ow</sup>), primary drainage (ПВД<sup>ow</sup>), intermediate imbibition (ПрВВ<sup>ow</sup>) and intermediate drainage (ПрВД<sup>ow</sup>) curves

поворотная точка  ${}^{\Delta}h_{ow,di}$   ${}^{\Delta}\theta_{w,di}$  принадлежит к ОВД<sup>ow</sup>, если

$$\theta_w^c({}^{\Delta}h_{ow}) = \left[ 1 + \left( {}^d\alpha_{ow} {}^{\Delta}h_{ow,di} \right)^{d\varepsilon_{ow}} \right]^{-d m_{ow}} (\theta_s - \theta_{wr}) + \theta_{wr};$$

$$\theta_w^c({}^{\Delta}h_{ow,di}) - {}^{\Delta}\theta_{w,di} \leq \pm 0,02. \quad (3.4)$$

### Расчет ПрВВ<sup>ow</sup>

I. Расчет  $\theta_w$  и  $\theta_o$  по  $h_{ow}$

$$1. \quad \bar{\theta}_w = \left[ 1 + \left\{ i\alpha_{ow} \left[ h_{ow} - (h^{np}) \right] \right\}^{i\varepsilon_{ow}} \right]^{-i m_{ow}}, \quad (3.5)$$

где 
$$h^{np} = \frac{h^m \theta_{ot}}{\theta_{ot}^m}; \quad \theta_{ot} = \tilde{\theta}_{ot} \theta_s; \quad \tilde{\theta}_{ot} = \tilde{\theta}_{ot}^m \left( 1 - \bar{M}_{ow} \right)^2; \quad (3.6)$$

$$\bar{M}_{ow} = \frac{M_{ow} - \tilde{\theta}_{wr}}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{or}^m}; \quad M_{ow} = {}^{\Delta}\tilde{\theta}_{w,di}; \quad {}^{\Delta}\tilde{\theta}_{w,di} = \frac{{}^{\Delta}\theta_{w,di}}{\theta_s}. \quad (3.7)$$

$$2. \quad \theta_w = \bar{\theta}_w (\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}) + \theta_{wr}. \quad (3.8)$$

$$3. \quad \theta_o = \theta_s - \theta_w. \quad (3.9)$$

II. Расчет  $h_o$  по  $\theta_w$

Если измерены  $\theta_o$ , то находится  $\theta_w = \theta_s - \theta_o$ , по которому выполняется расчет.

$$1. \quad \bar{\theta}_w = \frac{\theta_w - \theta_{wr}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}}, \quad (3.10)$$

где  $\theta_{ot}$  определяется по формулам (3.6)–(3.7).

$$2. \quad h_{ow} = \frac{1}{i\alpha_{ow}} \left[ \left( \frac{1}{\bar{\theta}_w} \right)^{\frac{1}{i m_{ow}}} - 1 \right]^{i\varepsilon_{ow}} + h^{np}; \quad h_w = -h_{ow}; \quad h_o = 0, \quad (3.11)$$

где  $h^{np}$  находится из уравнения (3.6).

III. Расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ )

$$1. \quad \tilde{\theta}_{wa} = \tilde{\theta}_w - \tilde{\theta}_{wr}. \quad (3.12)$$

$$2. \quad \Omega = 1 - \bar{\theta}_w + \bar{M}_{ow}, \quad (3.13)$$

где  $\bar{M}_{ow}$  определяется по формуле (3.7).

$$3. \quad k_{r,w} = \tilde{\theta}_{wa}^2 \left[ 1 + M_{ow}^{\lambda} - \Omega^{\lambda} \right], \quad (3.14)$$

где 
$$\chi = \frac{2 + \lambda}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{(1 - 0,5)^{\frac{1}{i m_{ow}}}}{1 - i m_{ow}}; \quad i m_{ow} = 1 - \frac{1}{i\varepsilon_{ow}}. \quad (3.15)$$

$$4. \quad k_w = k_{r,w} k_{s,w}. \quad (3.16)$$

$$5. \quad \tilde{\theta}_o = 1 - \tilde{\theta}_w. \quad (3.17)$$

$$6. \quad \tilde{\theta}_{oa} = \tilde{\theta}_o - \tilde{\theta}_{ot}, \quad (3.18)$$

где  $\tilde{\theta}_{or}$  находится из уравнения (3.6).



$$7. \quad k_{r,o} = \tilde{\theta}_{oa}^2 \left[ \Omega^z - \overline{M}_{ow}^z \right]. \quad (3.19)$$

$$8. \quad k_o = k_{r,o} k_{s,o}, \quad (3.20)$$

где  $k_{s,o} = \frac{k_{s,w} v_w}{v_o}$ .

### **Входные данные для расчета**

Ряды дискретных значений

$$h_{ow} \text{ и/или } \theta_w \text{ или } \theta_o, \theta_s, \theta_{wr}, \theta_{ot}^m, h^m, k_{s,w}, k_{s,o} \text{ (или } v_w, v_o), \\ (\Delta h_{ow,di}, \Delta \theta_{w,di}); {}^d\alpha_{ow}, {}^d\varepsilon_{ow}, {}^i\alpha_{ow}, {}^i\varepsilon_{ow}.$$

### **4. Первичная ветвь дренирования (ПВД<sup>ow</sup>)**

ПВД<sup>ow</sup> (рис. 2) начинается с  $\theta_w = {}^i\theta_w^m$  ОВВ<sup>ow</sup> при  $h_{ow} = -h^m$ .

#### **Условия идентификации ПВД<sup>ow</sup>**

$$\theta_{w1} = {}^i\theta_w^m > \theta_{w2} > \dots > \theta_{wk} = \theta_{wr} + \theta_{wt}^m; \quad (4.1)$$

$$\theta_{o1} = \theta_{ot}^m = \theta_s - {}^i\theta_w^m < \theta_{o2} = (\theta_s - \theta_{w2}) < \dots < \theta_{ok} < \theta_{oc}^m = \theta_s - \theta_{wr}; \quad (4.2)$$

$$h_{ow1} = h^m < h_{ow2} \dots < 0 \dots < h_{owk} \rightarrow +\infty; \quad (4.3)$$

условие полных рядов  $(\theta_w - h_{ow})$ :  $\frac{h_{ow2} - h_{ow1}}{\theta_{w1} - \theta_{w2}} > 450$  и  $\frac{h_{owk} - h_{owk-1}}{\theta_{wk-1} - \theta_{wk}} > 450$ , где  $450 \approx \text{tg } 89,8^\circ$ . (4.4)

Если условия выполняются, то ряды полные и  $\theta_{w1} \approx {}^i\theta_w^m$ , а  $\theta_{wk} \approx \overline{\theta}_{wr} = \theta_{wr} + \theta_{wt}^m$ , а  $h_{ow1} \approx h^m$ . Расчет по программе RETC определяются  ${}^d\alpha$  и  ${}^d\varepsilon$  при условных значениях:  ${}^i\theta_s = {}^i\theta_w^m$ ,  ${}^i\theta_{wr} = \overline{\theta}_{wr} = \theta_{wr} + \theta_{wt}^m$ ,  ${}^i h_{ow1} = 0$ , а  ${}^i h_{owi} = h_{owi} - (h^m)$ .

#### **Расчет ПВД<sup>ow</sup>**

I. Расчет  $\theta_w$  и  $\theta_o$  по  $h_{ow}$

$$1. \quad \overline{\theta}_{wc} = \left[ 1 + \left\{ {}^d\alpha_{ow} (h_{ow} - (h^m)) \right\} {}^d\varepsilon_{ow} \right]^{-d'm_{ow}}. \quad (4.5)$$

$$2. \quad \tilde{\theta}_{wc} = \overline{\theta}_{wc} (1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{wt}^m - \tilde{\theta}_{ot}^m) + \tilde{\theta}_{wr} + \tilde{\theta}_{wt}^m. \quad (4.6)$$

$$3. \quad \tilde{\theta}_{wt} = \tilde{\theta}_{wt}^m (1 - \tilde{\theta}_{wc} - \tilde{\theta}_{ot}^m). \quad (4.7)$$

$$4. \quad \tilde{\theta}_w = \tilde{\theta}_{wc} + \tilde{\theta}_{wt}. \quad (4.8)$$

$$5. \quad \theta_w = \tilde{\theta}_w \theta_s, \quad \theta_o = \theta_s - \theta_w. \quad (4.9)$$

II. Расчет  $h_{ow}$  по  $\theta_w$

$$1. \quad \tilde{\theta}_w = \frac{\theta_w}{\theta_s}. \quad (4.10)$$

$$2. \quad \left\{ \begin{array}{l} \tilde{\theta}_{wt} \text{ по формуле (4.6);} \\ \tilde{\theta}_{wc} = \tilde{\theta}_w - \tilde{\theta}_{wt}. \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Решением системы уравнений (2), (3) находятся  $\tilde{\theta}_{wt}$  и  $\tilde{\theta}_{wc}$ .

$$4. \quad \overline{\theta}_{wc} = \frac{\tilde{\theta}_{wc} - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{wt}^m}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{wt}^m - \tilde{\theta}_{ot}^m}. \quad (4.12)$$

$$5. \quad h_{ow} = \frac{1}{d' \alpha_{ow}} \left[ \left( \frac{1}{\bar{\theta}_{wc}} \right)^{d' m_{ow}} - 1 \right]^{\frac{1}{d' \varepsilon_{ow}}} + h^m; \quad h_w = -h_{ow}; \quad h_o = 0. \quad (4.13)$$

III. Расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ )

$$1. \quad \Omega = 1 - \bar{\theta}_{wc} \quad (4.14)$$

( $\bar{\theta}_{wc}$  находится по формуле (4.5) или (4.12)).

$$2. \quad \tilde{\theta}_{wa} = \tilde{\theta}_{wc} - \tilde{\theta}_{wr}. \quad (4.15)$$

$$3. \quad k_{r,w} = \tilde{\theta}_{wa}^2 [1 - \Omega^\chi]. \quad (4.16)$$

где  $\chi$  определяется по зависимости (3.15).

$$4. \quad k_w = k_{r,w} k_{s,w}. \quad (4.17)$$

$$5. \quad \tilde{\theta}_o = \frac{\theta_s - \theta_w}{\theta_s}. \quad (4.18)$$

$$6. \quad \tilde{\theta}_{oa} = \tilde{\theta}_o - \tilde{\theta}_{ot}^m. \quad (4.19)$$

$$7. \quad \bar{\theta}_o = \frac{\tilde{\theta}_{oa}}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}^m}. \quad (4.20)$$

$$8. \quad k_{r,o} = \tilde{\theta}_{oa}^2 \left[ \Omega^\chi - \tilde{\theta}_{wt}^m (1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}^m) (\bar{\theta}_o^\chi - \tilde{\theta}_{ot}^{m\chi}) \right]. \quad (4.21)$$

$$9. \quad k_o = k_{r,o} k_{s,o}. \quad (4.22)$$

IV. Расчет неполных рядов

Если условие (4.4) не выполняется, то ряды  $h_{ow}$  и  $\theta_w$  неполные и для расчета надо иметь лабораторные определения  $d' \alpha$ ,  $d' \varepsilon$ ,  $h^m$ ,  $\theta_{wt}^m$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{wr}$ ,  $\theta_{ot}^m$ .

1. Если  $h_{ow1} = h^m \pm 2$  см, то ряд относится к ПВВ<sup>ow</sup> и рассчитывается по процедуре I.

2. Если  $h_{ow1} > h^m$ , то он может быть как ПВД<sup>ow</sup>, так и ПзВД<sup>ow</sup>. Поэтому необходимо иметь хотя бы для одного  $h_{owe}$  соответствующее ему значение  $\theta_{owe}$ . По процедуре I рассчитывается  $\theta_w^c$  и сравнивается с экспериментальным  $\theta_{we}$ . При  $\theta_w^c - \theta_{we} = \pm 0,02$  ряд относится к ПВД<sup>ow</sup>.

Если члены ряда  $h_{ow}$  только положительны, то ряд может относиться еще к ОВД<sup>ow</sup>. Поэтому необходимо иметь дополнительно и лабораторные определения  $d' \alpha_{ow}$  и  $d' \varepsilon_{ow}$ . По формуле (1.6) находится  $\theta_w^c$ , которое сравнивается с  $\theta_{we}$ . При  $\theta_w^c - \theta_{we} = \pm 0,02$  ряд относится к ОВД<sup>ow</sup>.

3. Если  $\theta_{w1} = i \theta_w^m \pm 0,02$  или  $\theta_{wk} = (\theta_{wr} + \theta_{wt}^m) \pm 0,02$ , то ряд принадлежит к ПВД<sup>ow</sup> и рассчитывается по процедурам I–II.

Если  $\theta_{w1} < i \theta_w^m$  или  $\theta_{wk} > \theta_{wr} + \theta_{wt}^m$ , то для определения принадлежности ряда необходимо иметь хотя бы для одного  $\theta_w$  соответствующее ему значение  $h_{ow}$ . Тогда по процедуре II рассчитывается  $h_{ow}^c$  (формулы (4.10)–(4.13)), которое сравнивается с  $h_{ow}$ . При  $h_{ow}^c - h_{ow} \leq 2$  см ряд относится к ПВД<sup>ow</sup>.

#### **Входные данные для расчета**

Ряды дискретных значений  $h_{ow}$  и/или  $\theta_o$  или  $\theta_o$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{wr}$ ,  $\theta_{ot}^m$ ,  $\theta_{wt}^m$ ,  $h^m$ ,  $k_{s,w}$ ,  $k_{s,o}$  (или  $v_w$ ,  $v_o$ ).

Дополнительно для неполных рядов –  $d' \alpha_{ow}$ ,  $d' \varepsilon_{ow}$ ,  $d' \alpha_{ow}$ ,  $d' \varepsilon_{ow}$ ,  $h_{ow}(\theta_w)$ .

#### **5. Промежуточная ветвь дренирования (ПрВД<sup>ow</sup>)**

ПрВД<sup>ow</sup> (рис. 2) начинается с любой поворотной точки ( $\Delta h_{ow,id}$ ,  $\Delta \theta_{w,id}$ ), расположенной на ОВВ<sup>ow</sup>.



**Условия идентификации ПрВД<sup>ow</sup>**

$$\theta_{w_1} = \Delta \theta_{w,id} > \theta_{w_2} > \dots > \theta_{w_k} < (\theta_{wr} + \theta_{wt}^m); \quad (5.1)$$

$$\Delta \theta_{\alpha,id} = \theta_s - \Delta \theta_{w,id} < \theta_{o_2} = (\theta_s - \theta_{w_2}) < \dots < \theta_{o_k} = (\theta_s - \theta_{w_k}) < \theta_{oc}^m = \theta_s - \theta_{wr}; \quad (5.2)$$

$$\Delta h_{ow_1} = \Delta h_{ow,id} < h_{ow_2} < \dots < h_{ow_k} < +\infty; \quad (5.3)$$

поворотная точка  $\Delta h_{ow,id} \Delta \theta_{w,id}$  принадлежит к ОВВ<sup>ow</sup>, если  $\theta_w^c$ , рассчитанная по (2.6)–(2.9) и по  $\Delta h_{ow,id}$ ,  $i\alpha_{ow}$ ,  $i\varepsilon_{ow}$ , не будет отличаться от  $\Delta \theta_{w,id}$  больше, чем на  $\pm 0,02$ .

**Расчет ПрВД<sup>ow</sup>**

I. Расчет  $\theta_w$  и  $\theta_o$  по  $h_{ow}$

$$1. \quad \bar{\theta}_{wc}^{d'} = \left[ 1 + \left\{ d' \alpha_{ow} (h_{ow} - h^m) \right\}^{d' \varepsilon_{ow}} \right]^{-d' m_{ow}}. \quad (5.4)$$

$$2. \quad d' \theta_{wc} = \bar{\theta}_{wc}^{d'} (i \theta_w^m - \theta_{wr} - \theta_{wt}^m) + \theta_{wr} + \theta_{wt}^m. \quad (5.5)$$

$$3. \quad \theta_{oc}^{min} = \theta_s - \Delta \theta_{w,id}, \quad (5.6)$$

где  $\theta_{oc}^{min}$  – минимальное значение содержания ЛНП в сценарии насыщения.

$$4. \quad \begin{cases} \theta_{wc} = d' \theta_{wc} - (\theta_{wt}^m - \theta_{wt}); \\ \theta_{wt} = \theta_{wt}^m (\theta_s - \theta_{wc} - \theta_{oc}^{min}). \end{cases} \quad (5.7)$$

Решением системы (4) находятся  $\theta_{wt}$  и  $\theta_{wc}$ .

$$5. \quad \theta_w = \theta_{wc} + \theta_{wt}. \quad (5.8)$$

$$6. \quad \theta_o = \theta_s - \theta_w. \quad (5.9)$$

II. Расчет  $h_{ow}$  по  $\theta_w$

$$1. \quad \begin{cases} \theta_{wc} = \theta_w - \theta_{wt} \\ \theta_{wt} = \theta_{wt}^m (\theta_s - \theta_{wc} - \theta_{oc}^{min}). \end{cases} \quad (5.10)$$

Решением этой системы определяются  $\theta_{wt}$  и  $\theta_{wc}$ .

$$2. \quad d' \theta_{wc} = \theta_{wc} + (\theta_{wt}^m - \theta_{wt}). \quad (5.11)$$

$$3. \quad \bar{\theta}_{wc}^{d'} = \frac{d' \theta_{wc} - \theta_{wr} - \theta_{wt}^m}{i \theta_w^m - \theta_{wr} - \theta_{wt}^m}. \quad (5.12)$$

$$4. \quad h_{ow} = \frac{1}{d' \alpha_{ow}} \left[ \left( \frac{1}{\bar{\theta}_{wc}^{d'}} \right)^{\frac{1}{d' m_{ow}}} - 1 \right]^{d' \varepsilon_{ow}} + h^m; \quad h_w = -h_{ow}; \quad h_o = 0. \quad (5.13)$$

III. Расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ )

$$1. \quad \tilde{\theta}_{wa} = \frac{\theta_{wc} - \theta_{wr}}{\theta_s}. \quad (5.14)$$

$$2. \quad \bar{\theta}_{wc} = \frac{\theta_{wc} - \theta_{wr}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}^m}. \quad (5.15)$$

$$3. \quad \Omega = 1 - \bar{\theta}_{wc}. \quad (5.16)$$

$$4. \quad k_{r,w} = \tilde{\theta}_{va}^2 (1 - \Omega^\chi). \quad (5.17)$$

где  $\chi$  определяется по формуле (3.15).

$$5. \quad (k_w) = k_{r,w} k_{s,w}. \quad (5.18)$$

$$6. \quad \tilde{\theta}_{oa} = \frac{\theta_o + \theta_{wt} - \theta_{ot}^m}{\theta_s}. \quad (5.19)$$

$$7. \quad \bar{\theta}_o = \frac{\tilde{\theta}_{oa}}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}^m}. \quad (5.20)$$

$$8. \quad \bar{\theta}_{oc}^{\min} = \frac{\theta_{oc}^{\min} - \theta_{ot}^m}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}^m}. \quad (5.21)$$

$$9. \quad k_{r,o} = \tilde{\theta}_{oa}^2 \left\{ \left( \Omega^\chi - \theta_{wt}^m (1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}^m) \right) \left( \bar{\theta}_o - \bar{\theta}_{oc}^{\min} \right) \right\}. \quad (5.22)$$

$$10. \quad k_o = k_{r,o} k_{s,o}. \quad (5.23)$$

### Входные данные для расчета

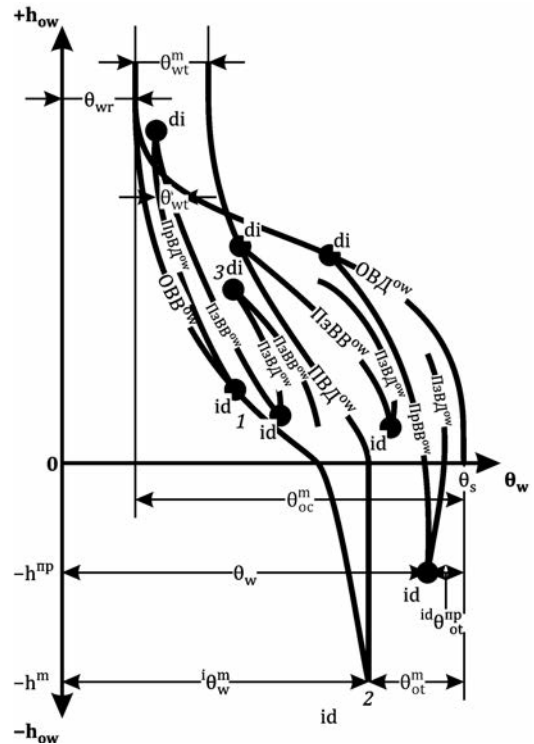
Ряды дискретных значений  $h_{ow}$  или  $\theta_w$  или  $\theta_o$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{wr}$ ,  $\theta_{ot}^m$ ,  $h^m$ ,  $\theta_{wt}^m$ ,  $k_{s,w}$ ,  $k_{s,o}$  (или  $v_w$ ,  $v_o$ ),  $d^i \alpha_{ow}$ ,  $d^i \varepsilon_{ow}$ ,  $i \alpha_{ow}$ ,  $i \varepsilon_{ow}$ , ( $\Delta h_{ow,id}$ ,  $\Delta \theta_{w,id}$ ).

### 6. Произвольная ветвь впитывания (ПзВВ<sup>ow</sup>)

ПзВВ<sup>ow</sup> может начинаться с любой точки ПрВД<sup>ow</sup>, ПВД<sup>ow</sup> и ПзВД<sup>ow</sup> (рис. 3).

**Рис. 3.** Зависимости  $\theta_w(h_{ow})$ , указывающие на основную ветвь дренирования (ОВД<sup>ow</sup>), основную ветвь впитывания (ОВВ<sup>ow</sup>), первичную ветвь дренирования (ПВД<sup>ow</sup>), промежуточную ветвь впитывания (ПрВВ<sup>ow</sup>), промежуточную ветвь дренирования (ПрВД<sup>ow</sup>), произвольную ветвь впитывания (ПзВВ<sup>ow</sup>) и произвольную ветвь дренирования (ПзВД<sup>ow</sup>)

**Fig. 3.**  $\theta_w(h_{ow})$  relationships main drainage (ОВД<sup>ow</sup>), main imbibition (ОВВ<sup>ow</sup>), primary drainage (ПВД<sup>ow</sup>), intermediate imbibition (ПрВВ<sup>ow</sup>), intermediate drainage (ПрВД<sup>ow</sup>), arbitrary imbibition (ПзВВ<sup>ow</sup>) and arbitrary drainage (ПзВД<sup>ow</sup>) curves



#### Условия идентификации ПзВВ<sup>ow</sup>

$$\theta_{wr} < \Delta \theta_{w,di} = \theta_{w1} < \theta_{w2} < \dots < \theta_{wk} > \theta_w^{np} > i \theta_w^m, \quad (6.1)$$

$$\theta_{oc}^m = (\theta_s - \theta_{wr}) > \theta_{o1} = (\theta_s - \theta_{w1}) > \dots > \theta_{ok} < \theta_{ot}^m, \quad (6.2)$$

$$h_{ow,di} = h_{ow1} > h_{ow2} > \dots > h_{owk} > h^m; \quad (6.3)$$

поворотная точка  $\Delta h_{di}$ ,  $\Delta \theta_{w,di}$  принадлежит к:

а) ПрВД<sup>ow</sup>, если поворотная точка (1) ( $\Delta h_{ow,id}$ ,  $\Delta \theta_{w,id}$ ) лежит на ОВВ<sup>ow</sup> с выполнением условий:

$$\theta_w^c (\Delta h_{ow,id}) = (\theta_w^m - \theta_{wr}) \left[ 1 + \left\{ i \alpha_{ow} (\Delta h_{ow,id} - h^m) \right\} i \varepsilon_{ow} \right]^{-i m_{ow}} + \theta_{wr}; \quad \theta_w^c - \Delta \theta_{w,id} \leq \pm 0,02;$$

б) ПВД<sup>ow</sup>, если поворотная точка (2) ( $\Delta h_{id} \Delta \theta_{w,id}$ ) есть конечной ОВВ<sup>ow</sup>, т. е.  $\Delta h_{ow,id} = h^m$ , а  $\Delta \theta_{w,id} = \theta_{wt}^m$ ;

в) ПзВД<sup>ow</sup> – (3), если условия а)–б) не выполняются.

### Расчет ПзВВ<sup>ow</sup>

I. Установление  $M_{ow}$  (индекс насыщенности жидким ЛНП, указывающий на наименьший размер пор, в которые ЛНП вытеснил воду) и  $\theta_{ot}$ .

$$1. \text{ Если } \Delta \theta_{w,di} < \theta_{wc}^{\min}, \quad (6.4)$$

$$\text{то } M_{ow} = \Delta \tilde{\theta}_{w,di}^*, M_{ow}^* = \tilde{\theta}_{wc}^{\min}.$$

$$\text{Если } \Delta \theta_{w,di} > \theta_{wc}^{\min}, \text{ то } M_{ow} = M_{ow}^* = \tilde{\theta}_{wc}^{\min}. \quad (6.5)$$

$$2. \overline{M}_{ow} = \frac{M_{ow} - \tilde{\theta}_{wr}^m}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}^m}; \quad \overline{M}_{ow}^* = \frac{M_{ow}^* - \tilde{\theta}_{wr}^m}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}^m}. \quad (6.6)$$

III. Расчет  $\theta_w$  и  $\theta_o$  по  $h_{ow}$

$$1. \quad \overline{\theta}_w^i(h_{ow}) = \frac{\left[ \overline{\theta}_w^i(h_{ow}) - \overline{\theta}_w^i(\Delta h_{ow,id}) \right] \left[ \Delta \overline{\theta}_{w,di} - \Delta \overline{\theta}_{w,id} \right]}{\overline{\theta}_w^i(\Delta h_{ow,di}) - \overline{\theta}_w^i(\Delta h_{ow,id})} + \Delta \overline{\theta}_{w,id}^* \quad (6.12)$$

$$a) \quad \overline{\theta}_w^i(h_{ow}) = \left[ 1 + \left\{ \alpha_{ow}^i(h_{ow} - h^m)^{i_{\varepsilon_{ow}}} \right\} \right]^{-i_{m_{ow}}}; \quad (6.13)$$

$$б) \quad \overline{\theta}_w^i(\Delta h_{ow,id}) = \left[ 1 + \left\{ \alpha_{ow}^i(\Delta h_{ow,id} - h^m)^{i_{\varepsilon_{ow}}} \right\} \right]^{-i_{m_{ow}}}; \quad (6.14)$$

$$в) \quad \overline{\theta}_w^i(\Delta h_{ow,di}) = \left[ 1 + \left\{ \alpha_{ow}^i(\Delta h_{ow,di} - h^m)^{i_{\varepsilon_{ow}}} \right\} \right]^{-i_{m_{ow}}}; \quad (6.15)$$

г)  $\Delta \overline{\theta}_{w,di}$  и  $\Delta \overline{\theta}_{w,id}$  берутся из расчета предыдущих веток дренирования и впитывания.

2. Составляется система уравнений:

$$\text{первое: } \theta_{wc}(h_{ow}) = \overline{\theta}_w^i(h_{ow}) [\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{wt} - \theta_{ot}] + \theta_{wr} + \theta_{wt}; \quad (6.16)$$

второе:  $\theta_{wt}$  – выбирается из процедуры // (6.8)–(6.11);

третье:  $\theta_{oc} = \theta_s - \theta_{wc}$ .

Решением этой системы находятся значения  $\theta_{wc}$  и  $\theta_{wt}$ .

$$3. \quad \theta_w(h_{ow}) = \theta_{wc}(h_{ow}) + \theta_{wt}; \quad \theta_o(h_{ow}) = \theta_s - \theta_w(h_{ow}). \quad (6.17)$$

IV. Расчет  $h_{ow}$  по  $\theta_w$

Если есть ряд  $\theta_o$ , то определяются  $\theta_w = \theta_s - \theta_o$ ,  $\tilde{\theta}_w = \frac{\theta_w}{\theta_s}$  и расчет проводится по  $\theta_w$ .

$$3. \tilde{\theta}_{ot} = \tilde{\theta}_{ot}^m \left( 1 - \overline{M}_{ow} \right)^2; \quad \theta_{ot} = \tilde{\theta}_{ot} \theta_s. \quad (6.7)$$

II. Установление  $\theta_{wt}$  (захваченной воды) в процессе впитывания ЛНП.

Если  $M_{ow} = M_{ow}^*$ , то

$$\tilde{\theta}_{wt} = \tilde{\theta}_{wt}^m (1 - \tilde{\theta}_{oc} - \tilde{\theta}_{oc}^{\min}). \quad (6.8)$$

Если  $M_{ow} < M_{ow}^*$  и  $1 - \tilde{\theta}_{wc} + M_{ow} \leq M_{ow}^* + \tilde{\theta}_{oc}^{\min}$ , то

$$\tilde{\theta}_{wt} = 0 \quad (6.9)$$

и устанавливается  $M_{ow} = M_{ow}^*$ .

Если  $1 - \tilde{\theta}_{wc} + M_{ow} > M_{ow}^* + \tilde{\theta}_{oc}^{\min}$ , то

$$\tilde{\theta}_{wt} = \tilde{\theta}_{wt}^m (1 - \tilde{\theta}_{wc} + M_{ow} - \tilde{\theta}_{oc}^{\min} - M_{ow}^*); \quad (6.10)$$

$$\theta_{wt} = \tilde{\theta}_{wt} \theta_s. \quad (6.11)$$

$$1. \quad \bar{\theta}_w^i(h_{ow}) = \frac{\left[ \bar{\theta}_w^i(h_{ow}) - \bar{\theta}_{w,id}^{\Delta} \right] \left[ \bar{\theta}_w^i(\Delta h_{ow,di}) - \bar{\theta}_w^i(\Delta h_{ow,id}) \right]}{\Delta \bar{\theta}_{w,di} - \Delta \bar{\theta}_{w,id}} + \bar{\theta}_w^i(\Delta h_{id}): \quad (6.18)$$

а)  $\bar{\theta}_w^i(\Delta h_{id})$ ,  $\bar{\theta}_w^i(\Delta h_{di})$ ,  $\bar{\theta}_{w,id}^{\Delta}$ ,  $\bar{\theta}_{w,di}^{\Delta}$  рассчитываются согласно процедуре III (б, в, г).

б) составляется система уравнений:

$$\text{первое:} \quad \bar{\theta}_w^i = \frac{\theta_{wc} - \theta_{wr} - \theta_{wt}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{wt} - \theta_{ot}}; \quad (6.19)$$

$$\text{второе:} \quad \theta_{wc} = \theta_w - \theta_{wt}; \quad (6.20)$$

третье:  $\theta_{wt}$  – рассчитывается по процедуре II (6.8)–(6.11).

Решением этой системы находятся значения  $\theta_{wt}$ ,  $\theta_{wc}$ ,  $\bar{\theta}_{wt}^i$ ; последнее подставляется в (6.18).

$$2. \quad h_{ow} = \frac{1}{\alpha_{ow}^i} \left[ \left( \frac{1}{\bar{\theta}_w^i(h_{ow})} \right)^{i_{m_{ow}}} - 1 \right]^{i_{\varepsilon_{ow}}} + h^m; \quad h_w = -h_{ow}; \quad h_o = 0. \quad (6.21)$$

V. Расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ ).

$$1. \quad \Omega = 1 - \bar{\theta}_w^i(h_{ow}) + \bar{M}_{ow}. \quad (6.22)$$

$$2. \quad \tilde{\theta}_{wa} = \frac{\theta_{wc} - \theta_{wr}}{\theta_s}. \quad (6.23)$$

$$3. \quad k_{r,w} = \tilde{\theta}_{wa}^2 \left[ 1 + \bar{M}_{ow}^\chi - \Omega^\chi \right], \quad (6.24)$$

где  $\chi$  рассчитывается по (3.15).

$$4. \quad k_w = k_{r,w} k_{s,w}. \quad (6.25)$$

$$5. \quad \tilde{\theta}_{oc} = 1 - \tilde{\theta}_w^i(h_{ow}). \quad (6.26)$$

$$6. \quad \tilde{\theta}_{oa} = \tilde{\theta}_{oc} + \tilde{\theta}_{wt} - \tilde{\theta}_{ot}. \quad (6.27)$$

$$7. \quad \bar{\theta}_o = \frac{\tilde{\theta}_{oa}}{1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}}. \quad (6.28)$$

$$8. \quad \bar{\theta}_{oc}^{\min} = \frac{\theta_{oc}^{\min} - \theta_{ot}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}}. \quad (6.29)$$

9. Расчет  $k_{r,o}$  по формулам (6.30)–(6.32):

Если  $\theta_{wt} = 0$ , то

$$k_{r,o} = \tilde{\theta}_{oa}^2 \left[ \Omega^\chi - \bar{M}_{ow}^\chi \right]. \quad (6.30)$$

Если  $\theta_{wt} > 0$  и  $M_{ow} = M_{ow}^*$ , то

$$k_{r,o} = \tilde{\theta}_{oa}^2 \left\{ \left( \Omega^\chi - \bar{M}_{ow}^\chi \right) - \tilde{\theta}_{wt}^m (1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}) \left( \left[ \bar{\theta}_o + \bar{M}_{ow} \right]^\chi - \left[ \bar{\theta}_{oc}^{\min} + \bar{M}_{ow} \right]^\chi \right) \right\} \quad (6.31)$$

и если  $M_{ow} < M_{ow}^*$  то

$$k_{r,o} = \tilde{\theta}_{oa}^2 \left\{ \left( \Omega^\lambda - \overline{M}_{ow}^\lambda \right) - \tilde{\theta}_{wt}^m (1 - \tilde{\theta}_{wr} - \tilde{\theta}_{ot}) \left( \left[ \overline{\theta}_o + \overline{M}_{ow} \right]^\lambda - \left[ \overline{\theta}_{oc}^{min} + \overline{M}_{ow}^* \right]^\lambda \right) \right\}. \quad (6.32)$$

$$10. \quad k_o = k_{r,o} k_{s,o}. \quad (6.33)$$

### Входные данные для расчета

Ряды дискретных значений  $h_{ow}$  или  $\theta_w$  или  $\theta_o$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{wr}$ ,  $\theta_{ot}^m$ ,  $h^m$ ,  $\theta_{wt}^m$ ,  $k_{s,w}$ ,  $k_{s,o}$  (или  $v_w$ ,  $v_o$ ),  $i\alpha_{ow}$ ,  $i\epsilon_{ow}$ ,  $(\Delta h_{ow,id} \Delta \theta_{w,id})$ ,  $(\Delta h_{ow,di} \Delta \theta_{w,di})$ .

## 7. Произвольная ветвь дренирования (ПзВД<sup>ow</sup>)

ПзВД<sup>ow</sup> может начинаться с любой точки ПрВВ<sup>ow</sup> или ПзВВ<sup>ow</sup> (рис. 3)

### Условия идентификации ПзВД<sup>ow</sup>

$$\Delta \theta_{w,id} = \theta_{w1} > \theta_{w2} > \dots > \theta_{wk}; \quad (7.1)$$

$$(\theta_s - \Delta \theta_{w,id}) = \theta_{o1} < \theta_{o2} = (\theta_s - \theta_{w2}) < \dots < \theta_{ok} = \theta_s - \theta_{wk}; \quad (7.2)$$

$$h^m < \Delta h_{ow,id} = h_{ow1} < h_{ow2} < \dots < h_{owk}; \quad (7.3)$$

поворотная точка  $(\Delta h_{ow,id} \Delta \theta_{w,id})$  принадлежит к ПрВВ<sup>ow</sup>, если поворотная точка  $(\Delta h_{ow,di} \Delta \theta_{w,di})$  принадлежит к ОВД с выполнением условий:

$$\theta_w^c(\Delta h_{ow,di}) = \left[ 1 + \left( {}^d\alpha_{ow} \Delta h_{ow,di} \right)^{d\epsilon_{ow}} \right]^{-d m_{ow}} (\theta_s - \theta_{wr}) + \theta_{wr}; \quad \theta_w^c(\Delta h_{ow,di}) - \Delta \theta_{w,di} \leq \pm 0,02.$$

Если условие не выполняется, то ПзВД<sup>ow</sup> выходит за пределы ПзВВ<sup>ow</sup>.

### Расчет ПзВД<sup>ow</sup>

I. Устанавливаются  $M_{ow}$ ,  $\theta_{ot}$  и  $\theta_{wt}$  по п. 6 (процедуры I, II), формулы (6.4)–(6.11).

II. Расчет значений  $\theta_w$  и  $\overline{\theta}_o$  по  $h_{ow}$

$$1. \quad \overline{\theta}_w^d(h_{ow}) = \frac{\left[ {}^d\overline{\theta}_w(h_{ow}) - {}^d\overline{\theta}_w(\Delta h_{ow,di}) \right] \left[ \Delta \overline{\theta}_{w,id} - \Delta \overline{\theta}_{w,di} \right]}{{}^d\overline{\theta}_w(\Delta h_{ow,id}) - {}^d\overline{\theta}_w(\Delta h_{ow,di})} + \Delta \overline{\theta}_{w,di}; \quad (7.4)$$

$$a) \quad {}^d\overline{\theta}_w(h_{ow}) = \left[ 1 + \left\{ {}^d\alpha_{ow}(h_{ow} - h^m) \right\}^{d\epsilon_{ow}} \right]^{-d m_{ow}}; \quad (7.5)$$

$$б) \quad {}^d\overline{\theta}_w(\Delta h_{ow,di}) = \left[ 1 + \left\{ {}^d\alpha_{ow}(\Delta h_{ow,di} - h^m) \right\}^{d\epsilon_{ow}} \right]^{-d m_{ow}}; \quad (7.6)$$

$$в) \quad {}^d\overline{\theta}_w(\Delta h_{ow,id}) = \left[ 1 + \left\{ {}^d\alpha_{ow}(\Delta h_{ow,id} - h^m) \right\}^{d\epsilon_{ow}} \right]^{-d m_{ow}}; \quad (7.7)$$

$$г) \quad \Delta \overline{\theta}_{w,id} = \frac{\Delta \theta_{w,id} - \theta_{wr}}{\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{ot}} \quad (7.8)$$

или берется из расчета последней точки соответственно ПрВВ или ПзВВ;

д)  $\Delta \overline{\theta}_{w,di}$  берется из расчета последней точки соответственно ОВД<sup>ow</sup>, ПрВД<sup>ow</sup>, ПВД<sup>ow</sup>, ПзВД<sup>ow</sup>.

2. Составляется система уравнений :

$$\text{первое: } \theta_{wc}(h_{ow}) = \bar{\theta}^d(h_{ow})[\theta_s - \theta_{wr} - \theta_{wt} - \theta_{or}] + \theta_{wr} + \theta_{wt}; \quad (7.9)$$

второе:  $\theta_{wt}$  – выбирается из п. 6, процедура II, уравнения (6.6)–(6.11);

третье:  $\theta_{oc} = \theta_s - \theta_{wc}$ .

Решением этой системы находятся значения  $\theta_{wc}$  и  $\theta_{wt}$ .

$$3. \quad \theta_w(h_{ow}) = \theta_{wc}(h_{ow}) + \theta_{wt}; \quad \theta_o(h_{ow}) = \theta_s - \theta_w(h_{ow}). \quad (7.10)$$

III. Расчет  $h_{ow}$  по  $\theta_w$

Если есть ряд  $\theta_o$ , то  $\theta_w = \theta_s - \theta_o$ ,  $\tilde{\theta}_w = \theta_w / \theta_s$ .

$$1. \quad \bar{\theta}_w^d(h_{ow}) = \frac{\left[ \bar{\theta}_w^d(h_{ow}) - \bar{\theta}_{w,di}^d \right] \left[ \bar{\theta}_w^d(\Delta h_{ow,id}) - \bar{\theta}_w^d(\Delta h_{ow,di}) \right]}{\bar{\theta}_{w,id}^d - \bar{\theta}_{w,di}^d} + \bar{\theta}_w^d(\Delta h_{ow,di}); \quad (7.11)$$

а)  $\bar{\theta}_w^d(\Delta h_{ow,id})$ ,  $\bar{\theta}_w^d(\Delta h_{ow,di})$ ,  $\bar{\theta}_{w,id}^d$ ,  $\bar{\theta}_{w,di}^d$  определяются аналогично процедуре II, п. 1, п. п. б)–д) (см. выше);

б) составляется система из трех уравнений, аналогичных представленным в п. 6 – процедура IV, решением которых определяются  $\tilde{\theta}_{wt}$ ,  $\tilde{\theta}_{wc}$  и  $\bar{\theta}_w^d$  (вместо  $\bar{\theta}_w^i$ ), которое подставляется в формулу (7.11).

$$2. \quad h_{ow} = \frac{1}{d\alpha_{ow}} \left[ \left( \frac{1}{\bar{\theta}_w^d(h_{ow})} \right)^{\frac{1}{d m_{ow}}} - 1 \right]^{\frac{1}{d \varepsilon_{ow}}} + h^m; \quad h_w = -h_{ow}; \quad h_o = 0. \quad (7.12)$$

IV. Расчет проницаемости воды ( $k_w$ ) и ЛНП ( $k_o$ )

1. Рассчитывается  $\Omega$  по формуле (6.22), только вместо  $\bar{\theta}_w^i(h_{ow})$  надо подставить  $\bar{\theta}_w^d(h_{ow})$ .
2. Рассчитывается  $\tilde{\theta}_{wa}$  по формуле (6.23).
3. Рассчитывается  $k_{r,w}$  по формуле (6.24).
4. Рассчитывается  $k_w$  по формуле (6.25).
5. Рассчитывается  $\tilde{\theta}_{oc}$  по формуле (6.26).
6. Рассчитывается  $\tilde{\theta}_{oa}$  по формуле (6.27).
7. Рассчитывается  $\bar{\theta}_o$  по формуле (6.28).
8. Рассчитывается  $\bar{\theta}_{oc}^{\min}$  по формуле (6.29).
9. Рассчитывается  $k_{r,o}$  по формулам (6.30)–(6.33).
10. Рассчитывается  $k_o$  по формуле (6.33).

#### **Входные данные для расчета**

Ряды дискретных значений  $h_{ow}$  или  $\theta_w$  или  $\theta_o$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{wr}$ ,  $\theta_{ot}^m$ ,  $h^m$ ,  $\theta_{wt}^m$ ,  $k_{s,w}$ ,  $k_{s,o}$  (или  $v_w$ ,  $v_o$ ),  $d\alpha_{ow}$ ,  $d\varepsilon_{ow}$ , поворотные точки  $(\Delta h_{ow,id}, \Delta \theta_{w,id})$ ,  $(\Delta h_{ow,di}, \Delta \theta_{w,di})$ .

#### **8. Порядок расчета рядов измерений $h_{ow}$ и $\theta_w$**

1. Измерения разбиваются на пути дренирования и впитывания по изменению в значениях  $h_{ow}$  и  $\theta_w$ :  $h_{ow}$  увеличивается,  $\theta_w$  уменьшается – путь дренирования;  $h_{ow}$  уменьшается,  $\theta_w$  увеличивается – путь впитывания.



2. Устанавливается по условиям идентификации принадлежность первого пути насыщения к соответствующей ветви, по которой проводится расчет.

3. Расчет второй и других ветвей выполняется в последовательности:

$$\begin{array}{l} \text{ОВД}^{\text{ов}} \quad \begin{array}{l} / \text{ПрВВ}^{\text{ов}} - \text{ПзВД}^{\text{ов}} - \text{ПзВВ}^{\text{ов}} - \text{ПзВД}^{\text{ов}} \text{ и т. п.} \\ \backslash \text{ОВВ}^{\text{ов}} \quad \begin{array}{l} / \text{ПВД}^{\text{ов}} - \text{ПзВВ}^{\text{ов}} - \text{ПзВД}^{\text{ов}} - \text{ПзВВ}^{\text{ов}} \text{ и т. п.} \\ \backslash \text{ПрВД}^{\text{ов}} - \text{ПзВВ}^{\text{ов}} - \text{ПзВД}^{\text{ов}} - \text{ПзВВ}^{\text{ов}} \text{ и т. п.} \end{array} \end{array} \end{array}$$

### Выводы

На основе параметрической модели R.J. Lenhard, and M. Oostrom [Lenhard, Oostrom, 1998] для прогноза зависимости «проницаемость – насыщенность – капиллярный напор» для системы «ЛНП – вода» в пористой среде со смешанной смоченностью разработана теоретическая база расчета всех возможных путей дренирования и впитывания, формирующихся при трансформации слоя с мобильным ЛНП в процессе колебания УГВ, а именно для: основной ветви дренирования (ОВД<sup>ов</sup>, рис. 1–3), основной ветви впитывания

(ОВВ<sup>ов</sup>, рис. 1–3), промежуточной ветви впитывания (ПрВВ<sup>ов</sup>, рис. 2, 3), первичной ветви дренирования (ПВД<sup>ов</sup>, рис. 2, 3), промежуточной ветви дренирования (ПрВД<sup>ов</sup>, рис. 2, 3), произвольной ветви дренирования (ПзВД<sup>ов</sup>, рис. 3), произвольной ветви впитывания (ПзВВ<sup>ов</sup>, рис. 3).

Данные расчеты могут быть использованы для определения содержания и распределения ЛНП в ГС, их изменения и трансформации в процессе колебания УГВ, а также для обоснования и определения эффективности санационных работ.

### Список литературы / References

1. 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).

2. Lenhard R.J. A parametric model for predicting relative permeability-saturation-capillary pressure relationship of oil-water systems in porous media with mixed wettability / R.J. Lenhard,

M. Oostrom // *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*, vol. 31, p. 109–131 (in English).

3. <http://www.usssl.arc.usda.gov/models> <http://www.usssl.arc.usda.gov/models> (in English).

Статья поступила  
23.02.2016