

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА СОСТОЯНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ЛЕГКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

### Статья 1. Проведение опыта с первоначальным подъемом уровня грунтовых вод после формирования слоя с мобильным легким нефтепродуктом

**Н.К. Парамонова<sup>1</sup>, Г.И. Голуб<sup>2</sup>, И.Н. Запольский<sup>3</sup>, О.И. Логвиненко<sup>4</sup>**

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

<sup>1</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Кандидат геологических наук, старший научный сотрудник.*

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

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

<sup>4</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: lohvynenko.olha@gmail.com  
Младший научный сотрудник.*

Для проверки правильности разработанной теоретической базы расчета флюидных систем в процессе колебания уровня грунтовых вод [Парамонова, Голуб и др., 2016; Огняник, Парамонова, Ст. 1, 2016; Огняник, Парамонова, Ст. 2–3, 2016; Парамонова, Гамшеева, Запольский, Ст. 4, 2016] проведены лабораторные физические эксперименты в колонне с песком. Сформирован слой с мобильным керосином на уровне воды, который подвергался первоначальному подъему и дельнейшим колебаниям. В процессе эксперимента фиксировались во времени уровни воды и керосина в скважине, а также их объем в песке колонны. По замеренным уровням воды и керосина в скважине на основании теоретических разработок определено изменение во времени состояния, распределения и объема воды и керосина в песке колонны. Расхождение рассчитанных и измеряемых объемов составляет около 5%, что подтверждает правильность теоретических разработок.

*Ключевые слова:* физический эксперимент, расчет флюидных систем, колебание уровня грунтовых вод, состояние, содержание и объем воды и керосина в геологической среде.

## LABORATORY STUDY OF GROUNDWATER TABLE FLUCTUATION INFLUENCE ON LIGHT PETROLEUM PRODUCT STATE AND CONTENT

### Paper 1. Experiment with initial groundwater table raising after formation of mobile light petroleum product lay

**N.K. Paramonova<sup>1</sup>, G.I. Golub<sup>2</sup>, I.N. Zapolskiy<sup>3</sup>, O.I. Logvinenko<sup>4</sup>**

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

<sup>1</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.*

<sup>2</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Scientific researcher.*

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

<sup>4</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: lohvynenko.olha@gmail.com  
Junior scientific researcher.*

For examination of elaborated theoretical foundation for fluid system calculation during groundwater table fluctuation [Paramonova, Golub et al., 2016; Ognianik, Paramonova, Paper 1, 2016; Ognianik, Paramonova, Papers 2–3, 2016; Paramonova, Gamsheyeva, Zapolskiy, Paper 4, 2016] laboratory physical experiments are carried out in the column with sand. The lay with mobile kerosene was formed at the water table that was initially raised and then was fluctuated. During experiment as the levels of water and kerosene in the well as their volume in sand of the column was fixed for a time. On theoretical foundation the state, content and volume of water and kerosene in sand of the column are calculated for a time by measured water and kerosene levels in the well. Divergence between calculated and measured volumes was near 5%, that confirms reality of theoretical foundation.

*Key words:* physical experiment, theoretical foundation for fluid system calculation, groundwater table fluctuation, water and kerosene content and volume in subsurface.

## ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛИВАННЯ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД НА СТАН І ВМІСТ ЛЕГКИХ НАФТОПРОДУКТІВ У ГЕОЛОГІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

### Стаття 1. Проведення дослід з початковим підйомом рівня ґрунтових вод після формування шару з мобільним легким нафтопродуктом

Н.К. Парамонова<sup>1</sup>, Г.І. Голуб<sup>2</sup>, І.М. Запольський<sup>3</sup>, О.І. Логвиненко<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup> Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: gwp\_ign@gwp.org.ua  
Кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник.

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

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

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

Для перевірки правильності розробленої теоретичної бази розрахунку флюїдних систем у процесі коливання рівня ґрунтових вод [Парамонова, Голуб та ін., 2016; Огняник, Парамонова, Ст. 1, 2016; Огняник, Парамонова, Ст. 2–3, 2016; Парамонова, Гамшеєва, Запольський, Ст. 4, 2016] виконано лабораторні фізичні експерименти в колоні з піском. Сформовано шар з мобільним гасом на рівні води, який зазнав початкового підйому і подальших коливань. В процесі експерименту фіксувалися в часі рівні води і гасу у свердловині, а також їх об'єм у піску колони. За замірними рівнями води і гасу у свердловині на підставі теоретичних розробок визначено зміну в часі стану, розподілу й обсягу води та гасу у піску колони. Розбіжність розрахованих і замірних об'ємів становить близько 5%, що підтверджує правильність теоретичних розробок.

*Ключові слова:* фізичний експеримент, розрахунок флюїдних систем, коливання рівня ґрунтових вод, стан, вміст та об'єм води й гасу у геологічному середовищі.

#### Введение

Одним из факторов, наиболее ощутимо действующим на пространственную трансформацию легкого нефтепродукта (ЛНП) в геологической среде (ГС), является колебание уровня грунтовых вод (УГВ), которое приводит к перемещению мобильного ЛНП по вертикали, уменьшая его количество в грунте при увеличивающейся или уменьшающейся мощности слоя в скважине. При этом мобильный ЛНП переходит в капиллярное, остаточное или защемленное состояние. Эти явления наблюдались на линзах авиационного керосина, сформировавшихся в

районе авиабаз в городах Узин, Прилуки, Луцк, где с подъемом УГВ мощность слоя с мобильным керосином в скважинах уменьшалась и даже исчезала, а при опускании УГВ вновь появлялась и возрастала даже после откачки керосина.

Для проектирования санации загрязненных ЛНП участков ГС необходимо четко знать, в каком количестве и в каком состоянии находится ЛНП и как он будет трансформироваться в процессе колебания УГВ (сезонного, годового, многолетнего). В статье [Парамонова, Голуб и др., 2016] нами разработана методика учета

остаточных и заземленных ЛНП в процессе колебания УГВ, в статье 1 [Огняник, Парамонова, 2016] и статьях 2–3 [Огняник, Парамонова (в печати)] – теоретическая база расчета флюидных систем в загрязненной ЛНП ГС, формирующихся в процессе колебания УГВ, а в статье 4 [Парамонова, Гамшеева, Запольский, 2016] – алгоритм расчета уровней, состояния, распределения содержания и объема воды и жидких ЛНП в линзе, сформировавшейся на УГВ в условиях его колебания.

Для проверки выполненных теоретических разработок проведены лабораторные физические эксперименты в колоннах с песком, в которых был сформирован слой с мобильным керосином на уровне воды, подвергшемся первоначальному подъему и опусканию с дальнейшими его колебаниями. Данная статья посвящена описанию и обработке эксперимента с первоначальным подъемом УГВ после формирования на нем слоя с мобильным ЛНП. Обработка заключалась в расчете по замеряемым уровням воды и керосина в скважине распределения содержания и объема их в песке колонны и в сравнении последних с опытными.

### 1. Проведение эксперимента

Эксперимент проведен в прозрачной колонне высотой 189,00 см с внутренней площадью 161,75 см<sup>2</sup>, заполненной песком с пористостью 0,353. Колонна оборудована на всю высоту скважиной в виде алюминиевого уголка площадью 1,125 см<sup>2</sup>, приклеенного к стенке, что дало возможность визуально наблюдать за изменением в ней уровней как воды, так и ЛНП.

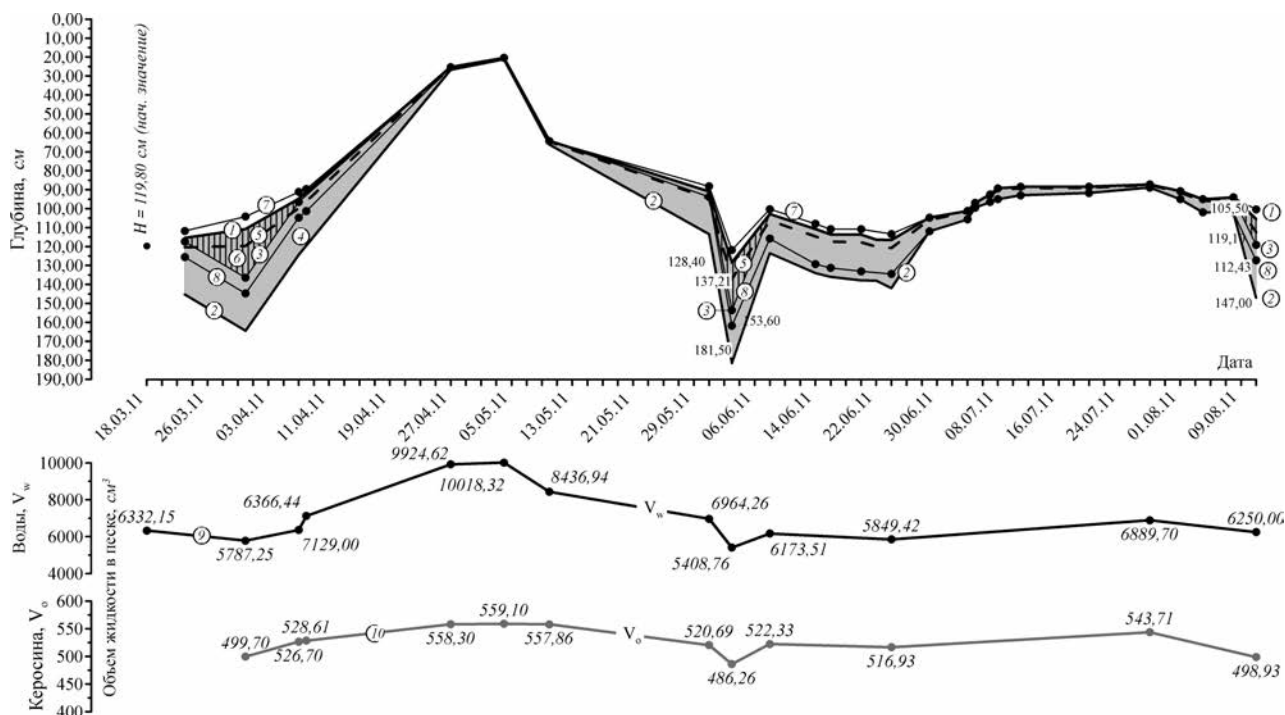
В качестве ЛНП применен извлеченный из земли ранее потерянный авиационный керосин с плотностью 0,833 г/см<sup>3</sup>. Сначала в процессе закладки в колонну песок полностью насытили водой объемом 11520 см<sup>3</sup>, что дало возможность определить пористость. Потом сдвинули 5110 см<sup>3</sup> до глубины 119,80 см, т. е. сформировали «водоносный горизонт» мощностью 69,20 см, и над ним зону аэрации мощностью 119,80 см (18.03.2011 г.). Граничное условие уровня водоносного горизонта задано на отметке, отвечающей глубине 119,8 см, в трубке, выходящей из поддона колонны. После этого через трубку над уровнем воды (УВ) подано 160,00 см<sup>3</sup> керосина (23.03.2011 г.), что сформировало на УВ слой с мобильным керосином в скважине мощностью 29,90 см. 31.03.2011 г.

подали еще 400 см<sup>3</sup> керосина, после чего его мощность в скважине возросла до 53,60 см. Больше керосин в колонну не подавался.

Далее выполнено поднятие УВ в колонне путем притока воды с границы, т. е. подачей через трубку в поддон. После каждой поданной порции воды измерялись глубины уровней  $H_{ao}^w$  «воздух – керосин» и  $H_{ow}^w$  «керосин – вода» в скважине, разность между которыми определяла мощность керосина  $T_o^w$  в скважине. Измерения проведены после полной стабилизации уровней. С подъемом УВ мощность керосина в скважине уменьшалась и на 04.05.2011 г. составила 0,80 см. После этого УВ в колонне начали ступенчатое опускание границы с измерением на каждой ступени установившихся уровней и объема вытекшей воды. По мере опускания уровней мощность керосина в скважине увеличивалась. Опускание проводилось до глубины  $H_{ow}^w = 181,10$  см, на которую позволила высота колонны, при этом мощность керосина в скважине составила  $T_o^w = 53,10$  см. Далее проведен подъем УВ к напору  $H = 106,26$  см, что уменьшило  $T_o^w = 0,70$  см; и снова его постепенное опускание к  $H = 120,76$  см, что, в свою очередь, дало небольшой прирост к  $T_o^w = 25,50$  см. Потом выполнено очень медленное поднятие УВ к  $H = 87,48$  см, в процессе которого мощность слоя керосина в скважине уменьшалась к  $T_o^w = 1,70$  см на 28.07.2011 г. В конце выполнено стремительное снижение УВ к  $H = 112,43$  см, чтобы он был в пределах начально сформированного слоя керосина. Получен значительный прирост мощности слоя керосина в скважине:  $T_o^w = 41,50$  см. Изменение уровней воды и керосина как в скважине, так и в песке колонны, а также объема воды и керосина в песке при подаче и вытекании воды из колонны показано на рис. 1.

### 2. Параметры, использующиеся для расчета флюидных систем

*Физические параметры* получены с помощью лабораторных измерений: плотность воды ( $\rho_w = 1$  г/см<sup>3</sup>), плотность керосина ( $\rho_o = 0,833$  г/см<sup>3</sup>), поверхностное натяжение границы раздела «воздух – вода» ( $\sigma_{aw} = 69,5$  дин/см), поверхностное натяжение границы раздела «воздух – керосин» ( $\sigma_{ao} = 24,55$  дин/см), поверхностное натяжение границы раздела «керосин – вода» ( $\sigma_{ow} = 17,03$  дин/см), полная насыщенность песка колонны флюидами (-ом) принята равной пористости ( $\theta_s = 0,353$ ).



**Рис. 1.** Изменение уровней воды и керосина в скважине и песке, а также объема керосина и воды в нем во время подачи и вытекания воды из колонны

1) глубина залегания уровня «воздух – керосин» в скважине и песке ( $H_{ao}^w = H_{ao}$ ); 2) глубина залегания уровня «керосин – вода» в скважине ( $H_{ow}^w$ ); 3) глубина залегания уровня «керосин – вода» в песке

$\left( H_{ow} = H_{ow}^w - \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}} \right)$ ; 4)  $T_o^w = H_{ow}^w - H_{ao}^w$  – мощность слоя керосина в скважине; 5) глубина залегания

рассчитанного напора воды ( $H = H_{ow}^w - T_o^w \rho_{r,o}$ ), где  $\rho_{r,o}$  – относительная плотность керосина (0,833);

6)  $T_o = H_{ow} - H_{ao}$  – мощность слоя мобильного керосина в песке, или  $T_o = T_o^w - \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$ ;  $T_o = 0$  при

$T_o^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}} = 27,9$  см; 7) глубина залегания рассчитанного капиллярного поднятия керосина в

воздухе  $\left( H_{ao}^c = \frac{\beta_{ao} \rho_{r,o} H_{ao}^w - H}{\beta_{ao} \rho_{r,o} - 1} \right)$ ; 8) глубина залегания рассчитанного капиллярного поднятия воды в

керосине  $\left( H_{ow}^c = H_{ow}^w - \frac{h_d^{ow}}{1 - \rho_{r,o}} \right)$ ; 9) измеренный объем воды в песке колонны ( $V_w$ ); 10) измеренный

объем керосина в песке колонны ( $V_o$ )

**Fig. 1.** Fluctuation of water and kerosene tables in the well and sand, the volume of water and kerosene in sand during water input and output

1) depth of the table “air – kerosene” in the well and sand ( $H_{ao}^w = H_{ao}$ ); 2) depth of the table “kerosene – water” in the well ( $H_{ow}^w$ ); 3) depth of the table “kerosene – water” in sand

$\left( H_{ow} = H_{ow}^w - \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}} \right)$ ;

4)  $T_o^w = H_{ow}^w - H_{ao}^w$  – kerosene thickness in the well; 5) depth of the calculated water head

( $H = H_{ow}^w - T_o^w \rho_{r,o}$ ); 6)  $T_o = H_{ow} - H_{ao}$  – mobile kerosene lay thickness in sand or  $T_o = T_o^w - \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$ ;  $T_o = 0$

at  $T_o^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}} = 27,9$  cm; 7) depth of the calculated kerosene capillary height in air

$\left( H_{ao}^c = \frac{\beta_{ao} \rho_{r,o} H_{ao}^w - H}{\beta_{ao} \rho_{r,o} - 1} \right)$ ; 8) depth of the calculated water capillary height in kerosene  $\left( H_{ow}^c = H_{ow}^w - \frac{h_d^{ow}}{1 - \rho_{r,o}} \right)$ ;

9) measured water volume in sand of the column ( $V_w$ ); 10) measured kerosene volume in sand of the column ( $V_o$ );



Параметры, использующиеся для расчета процессов дренирования и впитывания флюидных систем, найдены аппроксимацией соответствующими уравнениями замеров  $\theta_w(h_{aw})$ ,  $\theta_w(h_{ow})$ ,  $\theta_o(h_{ao})$ , где  $h_{aw}$ ,  $h_{ow}$ ,  $h_{ao}$  – капиллярные напоры в системах «воздух – вода» (aw), «керосин – вода» (ow), «воздух – керосин» (ao);  $\theta_w$ ,  $\theta_o$  – содержания воды и керосина, полученные при лабораторной физической имитации веток насыщения флюидами близкого по гранулометрическому составу и плотности песка, используемого в

колонне. Некоторые из них были скорректированы при расчете впервые встречающихся в опыте ветвей насыщения (отмечено звездочкой), чтобы получить известное из опыта содержание флюидов в песке колонны. Удовлетворительное совпадение расчетного и опытного содержания воды и керосина в песке колонны при дальнейших расчетах других ветвей насыщения флюидами говорит о достоверности используемых параметров.

Система «воздух – вода» (aw)

Процесс дренирования:  $\theta_{wr}^{aw} = 0,08$ ;  $\alpha_{aw}^d = 0,05737^* \frac{1}{\text{см}}$ ;  $\varepsilon_{aw}^d = 4,9371$ ;  $m_{aw}^d = 0,7974$ .

Процесс впитывания:  $\theta_w^m = 0,280$ ;  $\theta_{at,w}^m = 0,073$ ;  $\alpha_{aw}^i = 0,08329^* \frac{1}{\text{см}}$ ;  $\varepsilon_{aw}^i = 3,3370$ ;  $m_{aw}^i = 0,7003$ ,

где  $\theta_{or}^{aw}$  – минимальное содержание непрерывной воды в процессе дренирования;  $\alpha_{aw}^d$ ,  $\varepsilon_{aw}^d$ ,  $m_{aw}^d$  – параметры уравнения van Genuchten (VG), записанного для процесса дренирования;  $\theta_w^m$ ,  $\theta_{at,w}^m$  – максимальное содержание воды и максимальное содержание заземленного воздуха в процессе впитывания воды;  $\alpha_{aw}^i$ ,  $\varepsilon_{aw}^i$ ,  $m_{aw}^i$  – параметры уравнения VG, записанного для процесса впитывания.

Система «воздух – керосин» (ao)

Процесс дренирования:  $\theta_{or}^{ao} = 0,04$ ;  $\alpha_{ao}^d = 0,1371^* \frac{1}{\text{см}}$ ;  $\varepsilon_{ao}^d = 4,7398$ ;  $m_{ao}^d = 0,7890$ .

Процесс впитывания:  $\theta_o^m = 0,296$ ;  $\theta_{at,o}^m = 0,057$ ;  $\alpha_{ao}^i = 0,01625^* \frac{1}{\text{см}}$ ;  $\varepsilon_{ao}^i = 6,2621$ ;  $m_{ao}^i = 0,8403$ ,

где  $\theta_{wr}^{ao}$  – минимальное содержание непрерывного керосина в процессе дренирования; остальные обозначения аналогичны приведенным выше.

Система «керосин – вода» (ow)

Процесс дренирования:  $\theta_{wr}^{ow} = 0,05$ ;  $\alpha_{ow}^d = 0,1245^* \frac{1}{\text{см}}$ ;  $\varepsilon_{ow}^d = 3,1813$ ;  $m_{ow}^d = 0,6857$ .

Процесс впитывания:

$\theta_w^m = 0,323$ ;  $\theta_{ot,ow}^m = 0,03$ ;  $h^m = -4,5$  см;  $\alpha_{ow}^i = 0,1724^* \frac{1}{\text{см}}$ ;  $\varepsilon_{ow}^i = 1,5067$ ;  $m_{ow}^i = 0,3363$ .

Первичная ветка дренирования:  $\theta_{wr}^m = 0,02$ ;  $\alpha_{ow}^{d'} = 0,0561^* \frac{1}{\text{см}}$ ;  $\varepsilon_{ow}^{d'} = 1,289^*$ ;  $m_{ow}^{d'} = 0,2242$ .

Система «воздух – керосин – вода» (aow)

$\theta_{wr}^{aow} = 0,04$ ;  $\theta_{or}^{aow} = 0,03$ ;  $\theta_{tr}^{aow} = 0,07$ ,

где  $\theta_{tr}^{aow}$  – минимальное содержание непрерывной жидкости (вода + керосин) в процессе дренирования.

Расчет параметров, используемых для установления уровней и мощности слоя с мобильным керосином в песке колонны, показанных на рис. 1, а также при дальнейших расчетах воды и керосина в песке:

1) коэффициенты:  $\beta_{ao} = \sigma_{aw}/\sigma_{ao} = 2,831$ ;  $\beta_{ow} = \sigma_{aw}/\sigma_{ow} = 4,081$ ;  $\rho_{r,o} = \rho_o/\rho_w = 0,833$ ;

2) напор смещения воды в воздух ( $h_d^{aw}$ ):  $h_d^{aw} = \alpha_{aw}^d S_x^\lambda \left( S_x^{\frac{1}{m_{aw}^d}} - 1 \right)^{1-m_{aw}^d} = 13,2$  см,

где  $S_x = 0,72 - 0,35e^{-\varepsilon_{aw}^d}$ ;  $\lambda = \frac{m_{aw}^d \left( 1 - 0,5^{\frac{1}{m_{aw}^d}} \right)}{1 - m_{aw}^d}$ ;

3) напор смещения керосина в воздух ( $h_d^{ao}$ ):  $h_d^{ao} = \frac{h_d^{aw} \sigma_{aw}}{\sigma_{aw}} = 4,66$  см;

4) напор смещения воды в керосин ( $h_d^{ow}$ ):  $h_d^{ow} = \frac{h_d^{aw} \sigma_{ow}}{\sigma_{aw}} = 3,29$  см;

5)  $T_o = T_o^w - \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$ , где  $T_o$  – мощность слоя с мобильным керосином в песке,  $T_o^w$  – мощность

слоя керосина в скважине; если  $T_o^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}} = \frac{4,66}{1 - 0,833} = 27,9$  см, то  $T_o = 0$ .

### 3. Расчет содержания и объема воды и керосина в песке колонны с 18.03.2011 г. по 11.08.2011 г.

Содержание воды и керосина в песке рассчитано с использованием значений капиллярных напоров на основании теоретической базы расчета флюидных систем и алгоритма, приведенных в статьях 1–4 [Огняник, Парамонова, 2016; Парамонова, Гамшеева, Запольский, 2016]. Капиллярные напоры и выделенные ветви процессов впитывания или дренирования показаны на графиках (рис. 2) для характерных моментов времени формирования и трансформирования слоя с мобильным керосином.

Критерием правильности расчетов служило совпадение рассчитанных объемов воды и керосина в песке колонны с измеренными во время опыта (рис. 1). Ниже приведены расчеты на даты, когда происходили существенные изменения в насыщении песка, а именно: дренирование воды из насыщенного песка колонны, формирование слоя с мобильным керосином на УВ, подъем и опускание УВ, исчезновение и восстановление слоя с мобильным керосином.

На 18.03.2011 г. из песка колонны сдренировали воду после полного его насыщения до установления уровня воды на глубине 119,8 см, который был принят за уровень грунтовых вод (УГВ). Поэтому выше 119,8 см сформировалась ненасыщенная зона с капиллярным напором  $h_{aw} = 0 - 119,8$  см, ниже – насыщенная зона с капиллярным напором  $h_{aw} = 0$  и с насыщенностью воды  $\bar{\theta}_w = 1$ , отвечающей максимальному содержанию  $\theta_w = \theta_s$ , равному пористости песка  $n = 0,353$ .

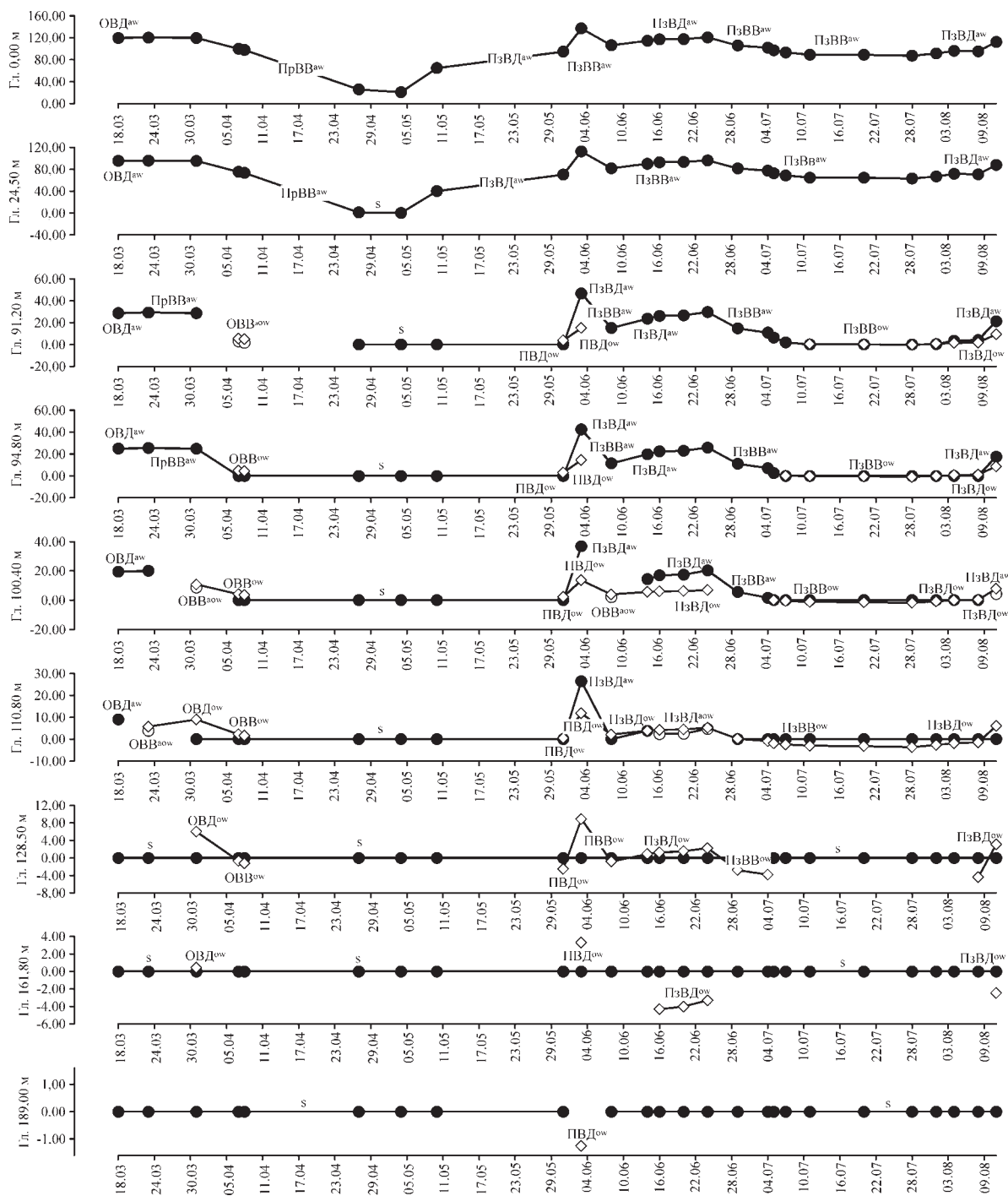
После дренирования воды до глубины 119,8 см сформировалась ненасыщенная зона из состояния полного насыщения ( $\theta_s$ ), что отвечает основной ветви дренирования в системе «воздух – вода» ОВД<sup>aw</sup>, которая описывается уравнением VG:

$$\bar{\theta}_w = [1 + (\alpha_{aw}^d h_{aw})^{e_{aw}^d}]^{-m_{aw}^d}; \theta_w = \bar{\theta}_w (\theta_s - \theta_{wr}^{aw}) + \theta_{wr}^{aw}. \quad (1)$$

Рассчитанный объем воды в песке колонны не совпадает с экспериментальным на 1,21%, что свидетельствует о достоверном подборе параметров.

В зону над сформированным уровнем воды (119,80 см) через трубку был подан керосин: на 23.03.2011 г. – 160 см<sup>3</sup>, а на 31.03.2011 г. – еще 400 см<sup>3</sup>. Сформировался слой мобильного керосина в скважине мощностью 53,60 см ( $H_{ao}^w = 110,80$  см,  $H_{ow}^w = 164,40$  см), а в песке – мощностью 25,70 см ( $H_{ao} = 110,80$  см,  $H_{ow} = 136,50$  см). Кроме того, образовалась капиллярная зона «воздух – керосин» ( $h_{ao}^c$ ) над уровнем  $H_{ao}$  до глубины  $H_{ao}^c = 104,23$  см и ниже уровня  $H_{ow}$  ( $h_{ow}^c$ ) до глубины  $H_{ow}^c = 144,70$  см. Занимая свое место в песке, керосин вытеснил часть воды в «водоносный горизонт», которая вытекла из колонны, а часть воды пошла на формирование водного профиля в ненасыщенной зоне. Согласно опытным измерениям, в песке колонны находилось 5787,2 см<sup>3</sup> воды.

Как видно на рис. 2, из-за поступления вытесненной воды из зоны формирования слоя с мобильным керосином до глубины 104,23 см произошло уменьшение капиллярного напора  $h_{aw}$  после ОВД<sup>aw</sup>. Этот процесс отвечает промежуточной ветви впитывания воды (ПрВВ<sup>aw</sup>). В интервале капиллярной зоны (104,23–110,80 см) формируется основная ветвь впитывания трехфлюидной системы «воздух – керосин – вода» (ОВВ<sup>aw</sup>). В интервале слоя с мобильным керосином и до глубины уровня капиллярной зоны «керосин – вода» ( $H_{ow}^c = 144,70$  см) прослеживается двухфлюидная система «керосин – вода» («о – w») с полной жидкостной насыщенностью и с увеличением капиллярного напора  $h_{ow}$ , что указывает на процесс основной ветви дренирования в системе «керосин – вода» (ОВД<sup>ow</sup>). Ниже глубины 144,70 см песок в колонне полностью насыщен водой, т. е. его содержание составляло  $\theta_w = 0,353$ .



**Рис. 2.** Графики распределения во времени и по глубине ( $z$ ) колонны рассчитанных капиллярных напоров  $h_c = \{h_{aw}, h_{ao}, h_{ow}\}$ :  $h_{aw} = H - z$  – «воздух – вода»;  $h_{ao} = \rho_{r,o} (H_{ao}^w - z)$  – «воздух – керосин»;  $h_{ow} = (1 - \rho_{r,o})(H_{ow}^w - z)$  – «керосин – вода». Пути насыщения: основной ветви дренирования (ОВД) и впитывания (ОВВ), промежуточной ветви впитывания (ПрВВ), первичной ветви дренирования (ПВД), произвольных ветвей впитывания (ПзВВ) и дренирования (ПзВД) систем «воздух – вода» (aw), «керосин – вода» (ow), «воздух – керосин – вода» (aow); s – полная насыщенность

**Fig. 2.** Distribution in time and depth ( $z$ ) of the column of calculated capillary heads  $h_c = \{h_{aw}, h_{ao}, h_{ow}\}$ :  $h_{aw} = H - z$  – «air – water»;  $h_{ao} = \rho_{r,o} (H_{ao}^w - z)$  – «air – kerosene»;  $h_{ow} = (1 - \rho_{r,o})(H_{ow}^w - z)$  – «kerosene – water». Saturation path: main drainage (ОВД) and imbibition (ОВВ), intermediate imbibition (ПрВВ), primary drainage (ПВД), arbitrary imbibition (ПзВВ) and drainage (ПзВД) of systems «air – water» (aw), «kerosene – water» (ow), «air – kerosene – water» (aow); s – total saturation

Ниже приведена методика расчета распределения содержания и объема керосина и воды в песке колонны на 31.03.2011 г.

Для  $z$ , где процесс насыщения отображает  $\text{ПрВВ}^{\text{aw}}$ , определяется кажущаяся насыщенность воды:

$$\bar{\theta}_w(h_{\text{aw}}) = [1 + (\alpha_{\text{aw}}^i h_{\text{aw}})^{\varepsilon_{\text{aw}}^i}]^{m_{\text{aw}}^i}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\text{aw}}^i = 0,08329 \text{ 1/см}$ ;  $\varepsilon_{\text{aw}}^i = 3,3370$ ;  $m_{\text{aw}}^i = 0,7003$ .

$$\theta_w = ({}^i\theta_w^m - \theta_{\text{wr}}^{\text{aw}})(\bar{\theta}_w(h_{\text{aw}}) - \bar{\theta}_{\text{at}}) + \theta_{\text{wr}}^{\text{aw}}, \quad (3)$$

где 
$$\bar{\theta}_{\text{at}} = {}^i\bar{\theta}_{\text{at}} \left( \frac{\bar{\theta}_w(h_{\text{aw}}) - \Delta \bar{\theta}_w}{1 - \Delta \bar{\theta}_w} \right) \text{ и } {}^i\bar{\theta}_{\text{at}} = \frac{\Delta \bar{\theta}_w}{1 + R_{\text{aw}}(1 - \Delta \bar{\theta}_w)}, \quad (4)$$

где  $\Delta \bar{\theta}_w$  рассчитано для поворотной точки с ОВД, в данном примере по формуле (1) для последней точки ОВД<sup>aw</sup>, т. е. на 23.03.2011 г.,  $R_{\text{aw}} = \frac{1}{m_{\text{aw}}^i} - 1$ , где  $m_{\text{at}}^i = 1 - ({}^i\theta_w^m - \theta_{\text{wr}}^{\text{aw}}) / (\theta_s - \theta_{\text{wr}}^{\text{aw}})$ ;  ${}^i\theta_w^m = 0,280$ ;  $\theta_{\text{wr}}^{\text{aw}} = 0,08$ .

Для  $z$ , где процесс насыщения отображает  $\text{ОВВ}^{\text{aow}}$ , рассчитывается полножидкостное содержание ( $\theta_\ell$ ) и содержание воды ( $\theta_w$ ), а содержание керосина находится как  $\theta_w = \theta_\ell - \theta_w$ .

Расчет  $\theta_\ell$

1. Определяется кажущаяся полножидкостная насыщенность:

$$\bar{\theta}_\ell = [1 + (\alpha_{\text{ao}}^i h_{\text{ao}})^{\varepsilon_{\text{ao}}^i}]^{m_{\text{ao}}^i}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{\text{ao}}^i = 0,1625 \text{ 1/см}$ ;  $\varepsilon_{\text{ao}}^i = 6,2621$ ;  $m_{\text{ao}}^i = 0,8403$  – определены экспериментально.

2. Находится эффективная полножидкостная насыщенность:

$$\bar{\theta}_\ell = \bar{\theta}_\ell - \bar{\theta}_{\text{at}} + \bar{\theta}_{\text{a,tw}}, \quad \bar{\theta}_{\text{a,tw}} = {}^i\bar{\theta}_{\text{a,tw}} \frac{\bar{\theta}_w - \theta_w^{\text{min}}}{1 - \theta_w^{\text{min}}}, \quad (6)$$

где  $\theta_w^{\text{min}}$  – наименьшее значение кажущейся насыщенности воды с момента появления керосина; для данного опыта  $\bar{\theta}_w = \theta_w^{\text{min}}$ . Расчет  $\bar{\theta}_w$  приведен ниже.

$${}^i\bar{\theta}_{\text{a,tw}} = \frac{1 - \theta_w^{\text{min}}}{1 + R_{\text{ow}}(1 - \theta_w^{\text{min}})}, \quad R_{\text{ow}} = \frac{1}{\bar{\theta}_{\text{ot,ow}}^m} - 1, \quad m_{\text{ot,ow}}^m = 1 - \frac{{}^i\theta_{\text{w,ow}}^m - \theta_{\text{wr}}^{\text{ow}}}{\theta_s - \theta_{\text{wr}}^{\text{ow}}}, \quad (7)$$

где  ${}^i\theta_{\text{w,ow}}^m = 0,323$ ;  $\theta_{\text{wr}}^{\text{ow}} = 0,05$ .

При  $\bar{\theta}_\ell > \Delta \bar{\theta}_w^{\text{aw}}$  
$$\bar{\theta}_{\text{at}} = {}^i\bar{\theta}_{\text{a,tw}} \frac{\bar{\theta}_w - \Delta \bar{\theta}_w^{\text{aw}}}{1 - \Delta \bar{\theta}_w^{\text{aw}}} + {}^i\bar{\theta}_{\text{a,to}} \frac{\bar{\theta}_\ell - \theta_\ell^{\text{min}}}{1 - \theta_\ell^{\text{min}}}, \quad (8)$$

где  $\Delta \bar{\theta}_w^{\text{aw}}$  – эффективная насыщенность в конечной точке системы «а – w»; в данном опыте это  $\bar{\theta}_w$ , рассчитанное в конечной точке ОВД<sup>aw</sup> по формуле (1) на 23.03.2011 г.;  $\theta_\ell^{\text{min}}$  – минимальное значение кажущейся полножидкостной насыщенности с момента появления керосина; для данного опыта  $\bar{\theta}_\ell^{\text{min}} = \bar{\theta}_\ell$ , т. е. второй член в уравнении (8) отсутствует.

$${}^i\bar{\theta}_{\text{a,tw}} = \frac{1 - \theta_w^{\text{min}}}{1 + R_{\text{aw}}(1 - \theta_w^{\text{min}})}; \quad R_{\text{aw}} = \frac{1}{\bar{\theta}_{\text{at,aw}}^m} - 1, \quad \bar{\theta}_{\text{at,aw}}^m = 1 - \frac{{}^i\theta_{\text{w,aw}}^m - \theta_{\text{wr}}^{\text{aw}}}{\theta_s - \theta_{\text{wr}}^{\text{aw}}}. \quad (9)$$

$${}^i\bar{\theta}_{\text{a,to}} = \frac{1 - \theta_\ell^{\text{min}}}{1 + R_{\text{ao}}(1 - \theta_\ell^{\text{min}})}; \quad R_{\text{ao}} = \frac{1}{\bar{\theta}_{\text{at,ao}}^m} - 1; \quad \bar{\theta}_{\text{at,ao}}^m = 1 - \frac{{}^i\theta_{\text{o,ao}}^m - \theta_{\text{or}}^{\text{ao}}}{\theta_s - \theta_{\text{or}}^{\text{ao}}}. \quad (10)$$

$$3. \theta_\ell = \bar{\theta}_\ell (\theta_s - \theta_{\text{r}\ell}^{\text{aow}}) + \theta_{\text{r}\ell}^{\text{aow}}. \quad (11)$$



### Расчет $\theta_w$

1. Определяется кажущаяся насыщенность воды

$$\bar{\theta}_w [1 + (\alpha_{ow}^i h_{ow}^i)^{\varepsilon_{ow}^i}]^{-m_{ow}^i}, \quad (12)$$

где  $\alpha_{ow}^i = 0,1724$  1/см;  $\varepsilon_{ow}^i = 1,5067$ ;  $m_{ow}^i = 0,3363$ .

2. Вычисляется эффективная насыщенность воды:

$$\bar{\theta}_w = \bar{\theta}_w - \bar{\theta}_{a,tw} - \bar{\theta}_{o,tw}, \quad (13)$$

где  $\bar{\theta}_{a,tw} = 0$ , если  $\bar{\theta}_\ell^{\min} \geq \Delta \bar{\theta}_w^{aw}$  и  $\bar{\theta}_w \leq \Delta \bar{\theta}_w^{aw}$ ;  $\bar{\theta}_{a,tw} = i \bar{\theta}_{a,tw} = \frac{\bar{\theta}_w - \Delta \bar{\theta}_w^{aw}}{1 - \Delta \bar{\theta}_w^{aw}}$ , если  $\bar{\theta}_\ell^{\min} \geq \Delta \bar{\theta}_w^{aw}$  и  $\bar{\theta}_w > \Delta \bar{\theta}_w^{aw}$ ;

$\bar{\theta}_{a,tw} = i \bar{\theta}_{a,tw} = \frac{\bar{\theta}_w - \bar{\theta}_\ell^{\min}}{1 - \bar{\theta}_\ell^{\min}}$ , если  $\bar{\theta}_\ell^{\min} \leq \Delta \bar{\theta}_w^{aw}$  и  $\bar{\theta}_w > \bar{\theta}_\ell^{\min}$ ;  $\bar{\theta}_{a,tw} = 0$ , если  $\bar{\theta}_\ell^{\min} \leq \Delta \bar{\theta}_w^{aw}$  и  $\bar{\theta}_w \leq \bar{\theta}_\ell^{\min}$ .

$i \bar{\theta}_{a,tw}$  определяется по формуле (9),  $i \bar{\theta}_{a,tw}$  – (10),  $i \bar{\theta}_{o,tw}$  – по уравнению (7).

Для  $z$ , где процесс насыщения отображает ОВД<sup>ow</sup>, расчет проведен по формулам:

$$\theta_w^{ow} = (\theta_s - \theta_{wt}^{ow}) [1 + (\alpha_{ow}^d h_{ow}^d)^{\varepsilon_{ow}^d}]^{-m_{ow}^d} + \theta_{wt}^{ow}; \quad \theta_o = \theta_s - \theta_w^{ow}, \quad (14)$$

где  $\alpha_{ow}^d = 0,1245$  1/см;  $\varepsilon_{ow}^d = 3,1813$ ;  $m_{ow}^d = 0,6857$ ;  $\theta_{wt}^{ow} = 0,05$ .

Расчитанные объемы воды и керосина не совпадают с опытными приблизительно на 2%.

На 07.04.2011 г. в песок колонны подано 624,20 см<sup>3</sup> воды. Это послужило причиной подъема слоя с мобильным керосином в скважине до  $H_{ao}^w = 94,80$  см и уменьшение его мощности до 29,60 см при  $H_{ow}^w = 124,40$  см. В песке мощность мобильного керосина составила всего 1,70 см. При этом  $H_{ao}^c = 91,18$  см, а  $H_{ow}^c = 104,70$  см. Количество керосина и воды в песке колонны увеличилось:  $V_o = 526,0$  см<sup>3</sup>,  $V_w = 6366,44$  см<sup>3</sup>.

От отметки 0 см до глубины 91,20 см происходило снижение капиллярного напора  $h_{aw}$ , что говорит о продолжении процесса ПрВВ<sup>aw</sup>, описанного на 31.03.2011 г.

В интервале глубин 91,20–94,80 см сформировалась новая капиллярная зона  $h_{ao}^c$ , в которой появляются капиллярные напоры  $h_{ao}$  и  $h_{av}$ , что говорит об ОВВ<sup>aw</sup> трехфлюидной системы, расчет которой описан на 31.03.2011 г.

В интервале глубин 94,80–96,50 см сформировалась насыщенная зона слоя с мобильным керосином, а до глубины 104,70 см – капиллярная зона  $h_{ao}^c$ , где прослеживается процесс ОВВ<sup>ow</sup>. Расчет содержания воды и керосина для  $z$ , где наблюдалась ОВВ<sup>ow</sup>, выполнен согласно статьи 2 [Огняник, Парамонова, 2016б], формул (2.1)–(2.9)\*.

На 31.03.2011 г. в интервале глубин 110,80–136,50 см находился слой мобильного керосина,

который водой был перенесен вверх и пошел на насыщение зоны 91,20–104,50 см, оставив после себя только содержание остаточного керосина  $\theta_{or}^m = 0,03$ , который защемился водой. В капиллярной зоне  $h_{ow}^c$ , сформировавшейся на 31.03.2011 г. и содержащей керосин менее  $\theta_{oi}^m = 0,03$ , содержание его осталось неизменным, но тоже защемиленным водой.

На 08.04.2011 г. в колонну было подано еще 766,0 см<sup>3</sup> воды. Это уменьшило мощность керосина в скважине до 27,90 см. При такой мощности керосина в скважине мобильный керосин в породе исчезает, т. е.  $T_o = 0$ . Мобильный керосин, который присутствовал в песке колонны на 07.04.2011 г., пошел на формирование капиллярных зон  $h_{ao}^c$  (89,70–93,10 см) и  $h_{ow}^c$  (93,10–112,50 см). В ненасыщенную зону «а – w» выше 89,70 см продолжает поступать вода, вызывая снижение капиллярного напора  $h_{aw}$  и продолжение процесса ПрВВ<sup>aw</sup>, расчет которого описан на 31.03.2011 г. В капиллярной зоне  $h_{ao}^c$  (89,70–93,10 см) процесс ПрВВ<sup>aw</sup> переходит в процесс ОВВ<sup>aw</sup>, описанный 31.03.2011 г., а в капиллярной зоне  $h_{ow}^c$  на глубине  $z = 93,10$  см процесс ОВВ<sup>aw</sup> переходит в процесс ОВВ<sup>ow</sup>, который происходит, как и 07.04.2011 г., до глубины 112,5 см. Ниже керосин остается защемиленным водой, что произошло 07.04.2011 г.

\* Здесь и далее из-за ограниченности объема статьи непосредственные расчеты содержания воды и керосина в песке колонны не приведены, а результаты расчетов представлены в бюджетном отчете за 2015 г. (№ госрегистрации 0110U001003).

Рассчитанный объем керосина превышает опытный на 2,17 %. Мобильный керосин отсутствует. Рассчитанный объем воды не совпадает с опытным на 1,29 %.

На 04.05.2011 г. подано еще 3001,60 см<sup>3</sup> воды, которая обусловила подъем напора воды до глубины 20,53 см, а мощность слоя керосина в скважине уменьшилась до 0,80 см (20,40–21,20 см) вследствие дренирования его в песок колонны, который тут же защемлялся водой. Керосин концентрировался обычно в прискважинной зоне. Вытекло в песок 30,49 см<sup>3</sup> керосина, предполагая его равномерное распределение в песке колонны. В опыте этот объем керосина учтен для расчета его баланса в песке колонны. В полевых условиях из-за ничтожного количества учитывать его нет смысла.

По данным опыта, в песке колонны находилось 559,10 см<sup>3</sup> керосина и 10018,32 см<sup>3</sup> воды. С 08.04.2011 г. по 04.05.2011 г. вода поднялась с глубины 89,70 см до 20,53 см, заполняя все пустые поры. Поэтому содержание воды в этой зоне определялось как разница между полной насыщенностью с  $\theta_s = 0,353$  и содержанием керосина  $\theta_o = 0,002722$ , т. е.  $\theta_w = 0,35035$ . Ниже глубины 89,70 см весь керосин был защемлен водой, и его содержание осталось неизменным с 08.04.2011 г. Только в интервале глубин 0–20,53 см продолжался процесс ПрВВ<sup>ав</sup>. Рассчитанный объем защемленного керосина составил 566,48 см<sup>3</sup>, что на 1,32% больше опытного.

После 04.05.2011 г. проведено дренирование воды из колонны путем понижения УВ на границе (в трубке, которая выходила из поддона колонны). На 31.05.2011 г. напор воды в песке колонны составил 94,76 см. По мере дренирования воды уровни  $H_{ao}^w$  и  $H_{ow}^w$  в скважине снижались, а мощность слоя керосина возрастала. Сначала незначительно (на 10.05.2011 г. – только на 1,1 см), когда проходил интервал глубин 20,40–64,30 см, где содержание керосина составляло лишь 0,002722 и в скважину могли попасть лишь некоторые крупные капли из прискважинной зоны. В скважину поступило 1,24 см<sup>3</sup> воды, что снизило содержание остаточного керосина в этой зоне до  $\theta_o = 0,002524$ . На 31.05.2011 г. мощность слоя керосина в скважине увеличилась до  $T_o = 22,50$  см, что меньше  $T_o = 27,90$  см. Поэтому слой мобильного керосина еще не сформировался, а начала формироваться лишь насыщенная капиллярная зона  $h_{ow}^c$ , нижняя граница которой находилась на глубине  $H_{ow}^c = 93,80$  см. В этой

зоне после полного насыщения водой происходил процесс первичной ветви дренирования в системе «керосин – вода» (ПВД<sup>ow</sup>), расчет которой проводился по формулам (4.1)–(4.9) статьи 2 [Огняник, Парамонова, 2016].

Выше капиллярной зоны (89,0 см) происходило дренирование воды. Это обусловило после ПрВВ<sup>ав</sup> процесс произвольной ветви дренирования в системе «воздух – вода» (ПзВД<sup>ав</sup>), в которой находился ранее защемленный керосин ( $\theta_{o,e}$ ), увеличивающий расчетное объемное содержание воды ( $\theta_w^c$ ), которая переместилась в более крупные поры. Поэтому содержание воды определено как  $\theta_w = \theta_w^c - \theta_{o,e}$ , где  $\theta_w^c$  – рассчитанное кажущееся содержание воды вместе с защемленным керосином;  $\theta_{o,e}$  – содержание защемленного керосина. Кажущееся содержание воды ( $\theta_w^c$ ) рассчитано по формулам (4.1) – (4.7) расчета ПзВД в статье 1 [Огняник, Парамонова, 2016]. Зона глубже 93,80 см оставалась насыщенной водой с защемленным керосином, который сформировался на 08.04.2011 г. Ниже глубины 144,50 см в песке колонны находилась только вода.

На 03.06.2011 г. проведено дренирование воды при напоре 137,26 см. Вытекло 1632,00 см<sup>3</sup>. В песке колонны осталось 5408,76 см<sup>3</sup> воды и 486,26 см<sup>3</sup> керосина. Мощность слоя керосина в скважине увеличилась до 53,10 см, что обусловило мощность слоя с мобильным керосином в песке 25,20 см ( $H_{ao} = 128,40$  см,  $H_{ow} = 153,60$  см). Над уровнем «воздух – керосин» сформировалась ненасыщенная капиллярная зона ( $h_{ao}^c$ ) до глубины  $H_{ao}^c = 121,86$  см, а ниже уровня «керосин – вода» – насыщенная капиллярная зона ( $h_{ow}^c$ ) до глубины  $H_{ow}^c = 161,80$  см. В интервале капиллярной зоны «воздух – керосин» (121,86–128,4 см) после полного насыщения водой с защемленным керосином и снижения УВ происходило освобождение керосина и перетекание до глубины 128,40 см, где формировался слой мобильного керосина, выше которого продолжались условия основной ветви дренирования, но в трехфлюидной системе (ОВД<sup>аow</sup>), расчет которой произведен по формулам (6) – (10) статьи 3 [Огняник, Парамонова, 2016].

От верха колонны до глубины 89,66 м под действием снижения УВ напоры  $h_{aw}$  продолжали падать, отображая условия ПзВД<sup>ав</sup>, в которой оставалось незначительное содержание остаточного керосина ( $\theta_{or} = 0,0025$ ), расчет которого описан выше. Рассчитанное содержание воды является кажущимся ( $\theta_w^c$ ) из-за содержания

**Таблица.** Распределение состояния керосина в песке колонны в процессе формирования и трансформации слоя с мобильным керосином в процессе колебания уровня воды:  $H_{ao}^w$ ,  $H$  – глубина уровня «воздух – керосин» и напора воды в скважине;  $T_o^w$  – мощность слоя керосина в скважине;  $T_o$  – мощность слоя с мобильным керосином в песке

**Table.** Distribution of kerosene state in sand of the column during formation and transformation of the lay with mobile kerosene during water table fluctuation:  $H_{ao}^w$ ,  $H$  – depth of the “air – kerosene” table and water head in the well;  $T_o^w$  – kerosene lay thickness in the well;  $T_o$  – mobile kerosene lay thickness in sand

Дата	$\frac{H_{ao}^w}{H}$	$\frac{T_o^w}{T_o}$	Состояние керосина в песке, см <sup>3</sup> /%					Примечание
			c	m	cs	e	r	
18.03.11	— 119,8	—	—	—	—	—	—	Формирование водоносного горизонта
31.03.11	110,8 — 119,75	53,60 — 25,70	110,97 — 21,73	356,26 — 69,76	43,43 — 8,51	—	—	Формирование слоя с мобильным керосином
07.04.11	94,80 — 99,74	29,60 — 1,70	41,16 — 7,65	31,69 — 5,89	348,22 — 64,68	117,23 — 21,78	—	Подъем УГВ
08.04.11	93,10 — 97,76	27,90 — 0	69,39 — 12,85	—	361,57 — 66,95	109,10 — 20,20	—	Подъем УГВ (продолжение)
04.05.11	20,40 — 20,53	0,80 — 0	—	—	—	566,48 — 100,00	—	Подъем УГВ (продолжение)
31.05.11	91,00 — 94,76	22,50 — 0	23,11 — 4,43	—	110,60 — 21,22	364,42 — 69,92	23,09 — 4,42	Опускание УГВ (начало)
03.06.11	128,40 — 137,26	53,10 — 25,20	52,90 — 10,61	173,23 — 34,74	131,42 — 26,36	—	141,03 — 28,29	Опускание УГВ до самого низкого положения
08.06.11	102,80 — 106,26	20,70 — 0	56,80 — 10,56	—	182,96 — 34,24	249,58 — 46,90	44,1 — 8,3	Подъем УГВ
24.06.11	116,50 — 120,76	25,50 — 0	48,76 — 9,59	—	105,38 — 20,73	249,58 — 49,10	104,63 — 20,58	Опускание УГВ
28.07.11	87,20 — 87,48	1,70 — 0	—	—	228,54 — 42,21	288,40 — 53,26	24,53 — 4,53	Подъем УГВ
11.08.11	105,50 — 112,43	41,50 — 13,60	55,63 — 10,83	108,99 — 21,22	50,02 — 9,74	249,58 — 48,58	49,46 — 9,63	Опускание УГВ

в нем защемленного керосина. Поэтому содержание воды определено как  $\theta_w = \theta_w^c - \theta_{ог}$ .

Под действием снижения УВ продолжался процесс дренирования сформированной на 31.05.2011 г. капиллярной зоны в интервале глубин 91,20–94,80 см, в результате чего снизилось содержание воды и керосина к остаточному. Аналогичный процесс происходил и ниже до глубины 121,86 см, но после раскрытия защемленного на 31.05.2011 г. керосина.

В насыщенной зоне формирования слоя с мобильным керосином и капиллярной каймы  $h_{ow}^c$  (128,40–161,80 см) происходило возрастание капиллярного напора  $h_{ow}$ , что говорит о процессе дренирования воды в системе «о – w». До глубины 144,50 см это было повторное дренирование (первое было ОВД<sup>ow</sup> 31.03.2011 г.), поэтому процесс идентифицирован как первичная ветвь дренирования (ПВД<sup>ow</sup>). С глубины 155,50 см процесс дренирования был первым, поэтому его отнесено к ОВД<sup>ow</sup>. Методика их расчетов приведена в статье 2 [Огняник, Парамонова, 2016]. Ниже глубины 161,80 см песок оставался полностью насыщенным водой. Расхождение между рассчитанными и экспериментальными объемами воды и керосина в колонне составляет соответственно 0,05 и 2,54%.

После максимального снижения напора воды 03.06.2011 г. произведен его подъем до глубины 106,26 см путем подачи в колонну 830,00 см<sup>3</sup> воды. При этом резко уменьшилась мощность керосина в скважине до 20,70 см, что привело к исчезновению слоя с мобильным керосином в песке колонны. Дальше был выполнен ряд незначительных опусканий и подъемов УВ, которые не привели к формированию слоя с мобильным керосином. Происходило переформирование капиллярных зон, возникновение и исчезновение остаточного и защемленного керосина.

После 28.07.2011 г. начали снижать напор воды, который на 11.08.2011 г. достиг глубины 112,43 см. При этом уровни в скважине  $H_{ao}^w$  и  $H_{ow}^w$  тоже опускались, а мощность слоя керосина постепенно незначительно увеличивалась. Резкое увеличение мощности слоя керосина в скважине произошло после 08.08.2011 г. (от 8,00 до 41,50 см) вместе с резким снижением напора воды, которое послужило причиной появления в песке слоя с мобильным керосином мощностью 13,60 см, а также формирование капиллярной зоны «а – о – w» над уровнем  $H_{ao}$  (105,50–96,50 см), в которой происходил процесс ПзВД<sup>ao</sup>, и капиллярной зоны

«о – w» под уровнем  $H_{ow}$  (119,10–127,30 см), где происходил процесс ПзВД<sup>ow</sup>.

Выше капиллярной зоны «а – о – w» капиллярный напор воды, по сравнению с 28.07.2011 г., увеличился, что указывает на процесс ПзВД<sup>ao</sup>. В интервале глубин 88,50–96,50 см, где на 28.07.2011 г. находился защемленный керосин, произошло его раскрытие и дренирование до остаточного. Методика расчета всех происходящих веток указана выше. Ниже капиллярной зоны  $h_{ow}^c$  песок насыщен водой и до глубины 155,5 см содержит защемленный ранее керосин с  $\theta_o = 0,03$ . Суммарный объем керосина по расчетам не совпадает с опытным на 2,96%, а воды – на 1,57%.

### Выводы

1. На сформированном в колонне с песком слое мобильного керосина мощностью 25,70 см и объемом керосина 560 см<sup>3</sup> проведены три поднятия и три опускания УВ. Изменяющееся при этом состояние керосина в песке показано в таблице.

2. Во время поднятия УВ мощность слоя керосина в скважине и слоя с мобильным керосином в песке уменьшаются. Керосин расходуется на формирование нового мобильного слоя и капиллярных зон  $h_{ao}^c$  и  $h_{ow}^c$ , оставляя после себя защемленный водой керосин (е). При мощности слоя керосина в скважине  $T_w = h_{ao}^{ao} / (1 - \rho_{г,о}) = 27,9$  см слой мобильного керосина в песке исчезает.

3. При опускании УВ мобильный и капиллярный керосин дренируются и, скапливаясь ниже и над УВ, образуют сначала новые капиллярные зоны, а при  $T_w > 27,9$  см – новый слой мобильного керосина (как 03.05.2011 г. и 11.08.2011 г.). При этом в песке после дренирования содержится остаточный керосин (г). Новый слой с мобильным керосином содержит его меньше, чем первичный. Так, 31.03.2011 г. содержание мобильного керосина составляло 356,26 см<sup>3</sup>, а 03.06.2011 г. – 173,23 см<sup>3</sup>; в конце третьего опускания УВ (11.08.2011 г.) в сформированном слое было 108,99 см<sup>3</sup> мобильного керосина, который составил 30,60% от первично сформированного. Кроме того, по мере колебания УВ уменьшается содержание мобильного керосина, который можно механически откачать. Если из первично сформированного слоя можно было отобрать 45,34%, то из последнего – лишь 12,06% от общего количества керосина в песке. Остальной керосин находится в капиллярном, остаточном и защемленном состояниях. При значительном подъеме УВ весь ЛНП может находиться в защемленном состоянии (04.05.2011 г.).



## Список литературы / References

1. **Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И., Негода Ю.А.** Влияние колебания уровня грунтовых вод на формирование остаточных и заземленных легких нефтепродуктов. *Геол. журн.* 2016. № 1 (354). С. 112–124.

**Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolski I.N., Logvinenko O.I., Negoda Y.A.,** 2016. Influence of water table fluctuations on formation of retained and trapped light petroleum products. *Geologichnyy zhurnal*, № 1 (354), p. 112–124 (in Russian).

2. **Огняник Н.С., Парамонова Н.К.** Теоретическая база расчета флюидных систем в загрязненной легкими нефтепродуктами геологической среде в процессе колебания уровня грунтовых вод. Ст. 1. Теоретическая база расчета двухфлюидной системы «воздух – смачивающий флюид» в пористой среде. *Геол. журн.* 2016. № 2 (355). С. 90–98.

**Ognianik N.S., Paramonova N.K.,** 2016. Theoretical foundation for calculation of fluid systems in the subsurface contaminated with light petroleum products during groundwater fluctuation. Paper 1. Theoretical foundation for calculation “air – wetting fluid” two-phase systems in porous media. *Geologichnyy zhurnal*, № 2 (355), p. 90–98 (in Russian).

3. **Огняник Н.С., Парамонова Н.К.** Теоретическая база расчета флюидных систем в загрязненной легкими нефтепродуктами геологической среде в процессе колебания уровня грунтовых вод. Ст. 2. Теоретическая база расчета двухфлюидной системы «легкие нефтепродукты – вода» в пористой среде. *Геол. журн.* 2016. № 3 (356). С. 89–103.

**Ognianik N.S., Paramonova N.K.,** 2017. 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. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (356), p. 89–103 (in Russian).

4. **Огняник Н.С., Парамонова Н.К.** Теоретическая база расчета флюидных систем в загрязненной легкими нефтепродуктами геологической среде в процессе колебания уровня грунтовых вод. Ст. 3. Теоретическая база расчета трехфлюидной системы «воздух – легкие нефтепродукты – вода» в пористой среде. *Геол. журн.* 2016. № 4 (357). С. 87–102.

**Ognianik N.S., Paramonova N.K.,** 2016. Theoretical foundation for calculation of fluid systems in the subsurface contaminated with light petroleum products during groundwater fluctuation. Paper 3. Theoretical foundation for calculation of “air – light petroleum products – water” three-phase systems in porous media. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (357), p. 87–102 (in Russian).

5. **Парамонова Н.К., Гамшеева И.С., Запольский И.Н.** Теоретическая база расчета флюидных систем в загрязненной легкими нефтепродуктами геологической среде в процессе колебания уровня грунтовых вод. Ст. 4. Порядок расчета и анализа флюидных систем в загрязненной легкими нефтепродуктами геологической среде в процессе колебания уровня грунтовых вод. *Геол. журн.* 2016. № 4 (357). С. 103–114.

**Paramonova N.K., Gamsheyeva I.S., Zapolskiy I.N.,** 2016. Theoretical foundation for calculation of fluid systems in the subsurface contaminated with light petroleum products during groundwater fluctuation. Paper 4. Calculation and analysis of fluid systems in the subsurface contaminated with light petroleum products during groundwater table fluctuations. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (357), p. 103–114 (in Russian).

Статья поступила  
15.02.2017