

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

Статья 2. Опыт с первоначальным опусканием напора воды после формирования слоя с мобильным керосином

Н.К. Парамонова¹, Г.И. Голуб², И.Н. Запольский³, О.И. Логвиненко⁴

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

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

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

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

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

Описан лабораторный физический эксперимент в колонне с песком, позволивший зафиксировать влияние колебания уровня грунтовых вод на распределение, содержание и состояние легких нефтепродуктов в геологической среде. Данный эксперимент отличается от описанного в работе [Парамонова и др., Ст. 1, 2017] тем, что после формирования слоя с мобильным керосином было произведено опускание уровня воды. По измеренным во времени уровням воды и керосина в скважине на основании теоретической базы, изложенной в статьях [Парамонова и др., 2016а; Огняник, Парамонова, Ст. 1–3, 2016а–в; Парамонова, Гамшеева, Запольский, Ст. 4, 2016б] рассчитано изменение во времени объема воды и керосина, распределения их содержания в песке по высоте колонны, а также определено состояние керосина. Расхождение рассчитанных и измеренных объемов воды и керосина составляет не более 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 2. Experiment with initial groundwater table lowering after formation of mobile petroleum product lay

N.K. Paramonova¹, G.I. Golub², I.N. Zapolskiy³, O.I. Logvinenko⁴

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

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

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

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

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

In this paper laboratory physical experiment in the column with sand is written. The experiment permitted to fix influence of groundwater table fluctuation on light petroleum product distribution of content and state in subsurface. This experiment differs from written in the Paper 1 [Парамонова и др., Ст. 1, 2017], that after formation of mobile light petroleum product lay groundwater table was lowered. On theoretical base given an account of papers [Парамонова и др., 2016а; Огняник, Парамонова, Ст. 1–3, 2016а–в; Парамонова, Гамшеева, Запольский, Ст. 4, 2016б] time change of water and kerosene volume, their content distribution in sand of the column and kerosene state was calculated by measures of water and kerosene levels in the well. Divergence between calculated and measured volumes was near 5% that confirms reality theoretical foundation.

Key words: physical experiment, calculation of fluids systems, groundwater table fluctuation, state, content and volume of water and kerosene in subsurface.

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

Стаття 2. Дослід з початковим опусканням напору води після формування шару з мобільним гасом

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

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

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

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

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

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

Описано лабораторний фізичний експеримент у колоні з піском, що дозволив зафіксувати вплив коливання рівня ґрунтових вод на розподіл, утримання та стан легких нафтопродуктів у геологічному середовищі. Даний експеримент відрізняється від описаного у роботі [Парамонова и др., Ст. 1, 2017] тим, що після формування шару з мобільним гасом було здійснено опускання рівня води. За виміряними у часі рівнями води й гасу у свердловині на основі теоретичної бази, викладеної в статтях [Парамонова и др., 2016а; Огняник, Парамонова, Ст. 1–3, 2016а–в; Парамонова, Гамшеева, Запольский, Ст. 4, 2016б], розраховано зміну у часі об'єму води й гасу, розподіл їх вмісту у піску по висоті колоні, а також визначено стан гасу. Розбіжність розрахованих і вимірених об'ємів води й гасу становить не більше 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

В настоящей работе продолжено описание лабораторных исследований, выполненных для подтверждения теоретической базы расчета флюидных систем в условиях колебания уровня грунтовых вод (УГВ), изложенной в статьях [Парамонова и др., 2016а; Огняник, Парамонова, Ст. 1–3, 2016а–в; Парамонова, Гамшеева, Запольский, Ст. 4, 2016б]. В данном эксперименте после формирования слоя с мобильным керосином на уровне воды (УВ) выполнено первоначальное его опускание. По измеренным УВ и керосина в скважине рассчитаны УВ и керосина, а

также распределение их содержания и объема в песке. Сравнение рассчитанных значений с экспериментальными дало возможность судить о правильности используемой теоретической базы.

Проведение опыта и полученные результаты

Опыт проведен в непрозрачной колонне (рис. 1) высотой 146,7 см и внутренней площадью 174,0 см², заполненной песком, диаметр частиц которого на 99,38% составил 1–0,63 мм. Колонна оборудована скважиной диаметром 2,52 см до глубины 142,7 см. Колонна и скважина имеют

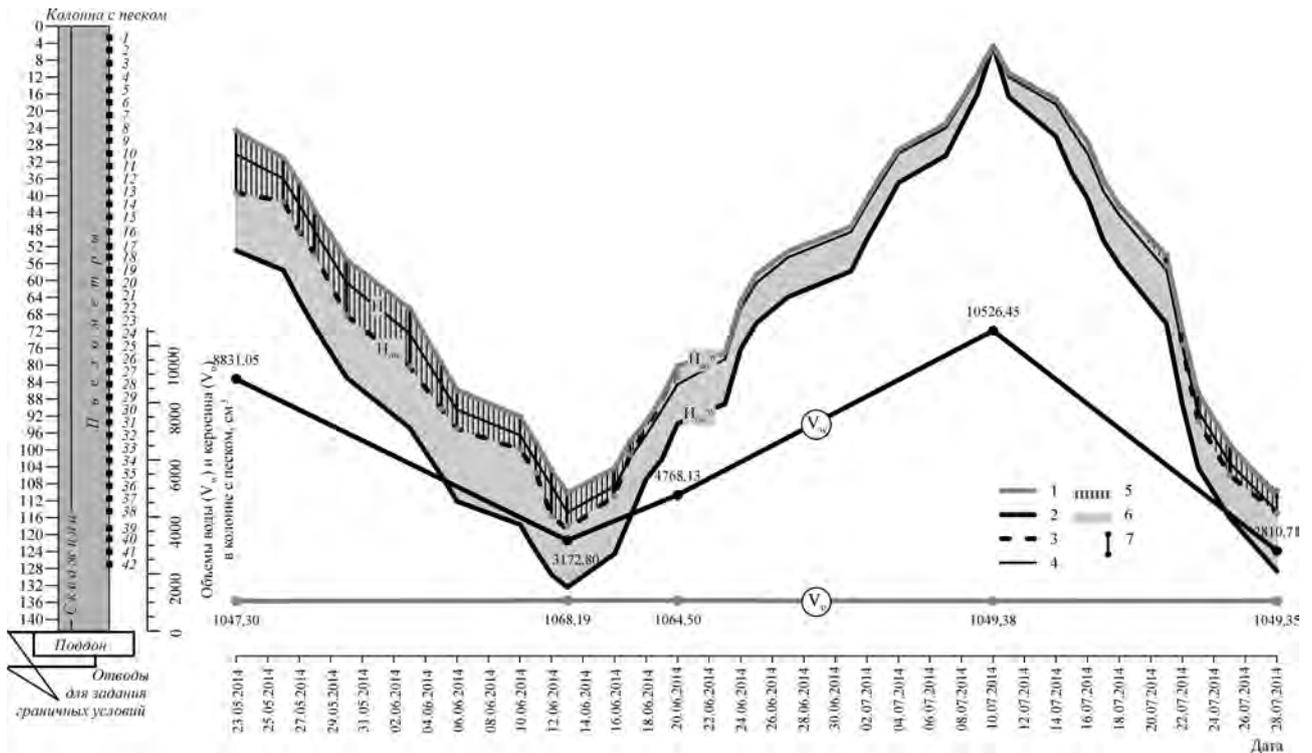


Рис. 1. Изменение УВ и керосина в скважине и песке, а также объема керосина и воды в нем при вытекании и подаче воды после формирования слоя с мобильным керосином

1 – измеренный уровень «воздух – керосин» в скважине (H_{aw}^w); 2 – то же «керосин – вода» (H_{ow}^w); 3 – рассчитанный уровень «керосин – вода» в песке (H_{ow}); 4 – напор воды (заданный) (H); 5 – мощность керосина в песке; 6 – то же в скважине; 7 – мощность керосина в песке, зафиксированная пьезометрами

Fig. 1. Change of tables in the well and in sand, water and kerosene volume in sand during water outflow and feeding after mobile kerosene lay formation

1 – same “air – kerosene” (H_{aw}^w); 2 – same “kerosene – water” (H_{ow}^w); 3 – calculated “kerosene – water” table in sand (H_{ow}); 4 – water head (assigned) (H); 5 – kerosene thickness in sand; 6 – same in the well; 7 – kerosene thickness in sand, found by piezometers

выводные трубки для задания граничных условий путем установления соответствующих напоров воды и для измерения при этом количества поданной и вытекшей из поддона воды. Уровень «керосин – вода» («о – w») в скважине измеряли с помощью электроуровнемера, а уровень «воздух – керосин» («а – о») – штырем, покрытым краской, изменяющей цвет при соприкосновении с керосином. Уровни мобильного керосина и его мощность в песке колонны фиксировали 42 пьезометрами, установленными в песок через стенку колонны, в основном через 4 см.

Песок уложен в воду при постепенном ее поднятии с пористостью 0,446, которая была определена по количеству поданной в колонну воды. Затем спустили воду до глубины 30,0 см, при которой сформировали слой мобильного керосина.

При спуске воды происходил процесс основной ветви дренирования в системе «воздух – вода» (ОВД^{aw}), после которого в песке колонны

до глубины 30,0 см осталось 627,27 см³ воды. Это количество воды было использовано для корректировки параметров уравнения Van Genuchten (VG) [Van Genuchten, 1980] для ОВД^{aw}. Сначала параметры были получены лабораторно на опытном образце этого же песка, но с пористостью 0,437: $\alpha_{aw}^d = 0,109 \text{ см}^{-1}$; $\varepsilon_{aw}^d = 5,67$; $\theta_{wr} = 0,014$.

Для песка колонны значение α_{aw}^d было скорректировано ($\alpha_{aw}^d = 0,154 \text{ см}^{-1}$) так, чтобы рассчитанное количество воды в песке колонны до глубины 30 см было близким к замеренному (627,27 см³). Расчет выполняли по формулам (1.4) и (1.5) работы [Огняник, Парамонова, Ст. 1, 2016а].

На глубине $H = 30,2$ см сформирован слой керосина путем подачи его в кольцо на поверхности песка. Использовали авиационный керосин, купленный на складе аэропорта «Жуляны». Мощность слоя керосина в скважине

составила: $T_o^w = H_{ow}^w - H_{ao}^w = 52,9 - 24,6 = 28,3$ см, где H_{ow}^w – глубина залегания уровня «керосин – вода» в скважине; H_{ao}^w – глубина залегания уровня «воздух – керосин» в скважине. В песке мощность слоя керосина (T_o) определена по разности глубин залегания нижнего пьезометра № 13 (39,2 см) и напора керосина в верхнем пьезометре № 9 (24,6 см), в которых появился керосин: $T_o = 39,2 - 24,6 = 14,6$ см. Так как $H = H_{ow}^w - T_o^w \rho_{r,o}$, то по известным H , H_{ow}^w и T_o^w определено значение относительной плотности керосина: $\rho_{r,o} = \rho_o / \rho_w = (52,9 - 30,2) / 28,3 = 0,802$. При плотности воды $\rho_w = 1$ г/см³ плотность керосина $\rho_o = 0,802$ г/см³. Используя известные $T_o^w = 28,3$ см и $T_o = 14,6$ см, а также формулу $T_o = T_o^w - h_d^{ao} / (1 - \rho_{r,o})$, получаем значение $\frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}} = 13,7$ см, которое представляет собой постоянную разность между T_o^w и T_o . Из этого выражения определено значение напора сдвига керосина в воздух $h_d^{ao} = 2,71$ см.

После формирования слоя с мобильным керосином выполнено опускание УВ на всю высоту колонны, затем его подъем и повторное опускание. Изменяющиеся при этом уровни и мощность слоя с мобильным керосином показаны на рис. 1, а изменение капиллярных напоров в песке колонны для некоторых глубин – в таблице. На рис. 1 приведено изменение мощности слоя с мобильным керосином в песке колонны в связи с изменением УВ (H), рассчитанной и замеренной по пьезометрам, которые расположены достаточно близко между собой.

По полученным $\alpha_{aw}^d = 0,154$ см⁻¹ и $\varepsilon_{aw}^d = 5,67$ с использованием формулы

$$h_d = \alpha^{-1} S_x^{1/\lambda} \left(S_x^{1/m} - 1 \right)^{1-m}, \text{ где}$$

$$S_x = 0,72 - 0,5e^{\varepsilon^4}, \lambda = \frac{m(1 - 0,5^{1/m})}{1 - m},$$

определено $h_d^{aw} = 5,06$ см, с учетом которого и измеренного поверхностного натяжения воды $\sigma_{aw} = 67,1$ дин/см по соотношению $h_{aw} / \sigma_{aw} = h_{ao} / \sigma_{ao}$ рассчитано значение $\sigma_{ao} = 35,94$ дин/см.

$\sigma_{ow} = 31,16$ дин/см найдено как разность между σ_{aw} и σ_{ao} . Тогда $\beta_{ao} = \sigma_{aw} / \sigma_{ao} = 1,867$, а $\beta_{ow} = \sigma_{aw} / \sigma_{ow} = 2,153$.

$\alpha_{ao}^d = 0,2710$ и $\alpha_{ow}^d = 0,3316$ определены из соотношения: $\alpha_{aw} \sigma_{aw} = \alpha_{ao} \sigma_{ao} = \alpha_{ow} \sigma_{ow}$.

$\varepsilon_{ao}^d = 5,4434$ и $\varepsilon_{ow}^d = 3,652$ приняты меньше ε_{aw}^d по аналогии с ранее выполненными лабораторными исследованиями. Также были введены параметры для процесса впитывания: $\alpha_{aw}^i = 0,2507$ см⁻¹; $\alpha_{ao}^i = 0,441$ см⁻¹; $\alpha_{ow}^i = 0,5791$ см⁻¹; кроме того, $\varepsilon_{aw}^i = 4,034$ см⁻¹; $\varepsilon_{ao}^i = 4,369$ см⁻¹; $\varepsilon_{ow}^i = 2,3796$ см⁻¹; $\theta_{wr}^{ow} = 0,009$; $\theta_{or}^{ao} = 0,008$; ${}^m\theta_{or}^{ow} = 0,0054$; $\theta_{\varepsilon_r}^{aow} = 0,0512$; $\theta_{wr}^{aow} = 0,0262$; $\theta_{or}^{aow} = 0,0250$. Последние три параметра (остаточное содержание жидкости (ℓ), воды (w) и керосина (o)) для трехфлюидной системы определены по их содержанию в песке колонны после полугодичного стекания из колонны.

От поверхности песка до глубины 15 см продолжался процесс ОВД^{aw}, описывающийся капиллярными напорами h_{aw} . В интервале глубин 15,0–24,6 см произошло формирование капиллярной трехфлюидной зоны «а – о – w», в которой содержание воды рассчитано по процессу ОВД^{ow*} с использованием капиллярных напоров h_{ow} . Содержание керосина определено как разность между полножидкостным содержанием и содержанием воды. Полножидкостное содержание вычислено из уравнения, описывающего процесс ОВВ^{ao} с использованием капиллярных напоров h_{ao} . В интервале глубин 24,6–39,2 см произошло формирование слоя с мобильным керосином, а в интервале 39,2–52,9 см – капиллярной зоны «керосин – вода». Здесь происходил процесс ОВД^{ow} с полножидкостным содержанием $\theta_1 = \theta_s = 0,446$. Для получения лучшей сходимости рассчитанного и опытного объемов керосина в песке колонны был скорректирован параметр $\alpha_{ow}^d = 0,3458$. Несовпадение рассчитанного и измеренного объемов воды в колонне составило 2,11, а объема керосина – 4,12%. В процессе формирования слоя керосин в песке колонны распределился следующим образом (%): в ненасыщенной капиллярной зоне – 15,56; в слое с мобильным керосином – 71,75; в насыщенной капиллярной зоне – 12,69.

* Расчеты проведены для указанных процессов насыщения и дренирования на основе теоретической базы, изложенной в работах [Огняник, Парамонова, Ст. 1–3, 2016а–в], а также алгоритма, приведенного в Ст. 4 [Парамонова, Гамшеева, Запольский, 2016б].

Изменение капиллярных напоров в песке колонны в процессе колебания УВ
Capillary head change in sand of the column during water table fluctuation

Глубина, см	Капиллярный напор, см	Дата (годы)															
		22.05.14	23.05.14	27.05.14	28.05.14	05.06.14	13.06.14	17.06.14	19.06.14	20.06.14	23.06.14	10.07.14	11.07.14	16.07.14	17.07.14	23.07.14	28.07.14
0,00	$h_{ав}$	30,00	30,2	42,00	48,5	84,5	114,5	101,8	90,6	84,5	78,5	4,5	12,00	30,00	39,00	90,7	114,5
	$h_{до}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$h_{овв}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20,00	Процесс	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВВ ^{ав}									
	$h_{ав}$	10,00	-	22,00	28,5	64,5	94,5	81,8	70,6	64,5	58,5	0,00	0,00	10,00	19,00	70,7	94,5
	$h_{до}$	-	3,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24,6	Процесс	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВВ ^{ав}									
	$h_{ав}$	5,4	0,00	17,4	23,9	59,9	89,9	77,2	66,00	59,9	53,9	0,00	0,00	-	14,4	66,1	89,9
	$h_{до}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,16	-	-	-
50,00	Процесс	ОВД ^{ав}	ОВД ^{овв}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВВ ^{ав}									
	$h_{ав}$	0,00	0,00	0,00	0,00	34,5	64,5	51,8	40,6	34,5	28,5	0,00	0,00	0,00	0,00	40,9	64,5
	$h_{до}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75,00	Процесс	s	s	s	ОВД ^{овв}	ОВД ^{ав}	ОВД ^{ав}	ОВВ ^{ав}									
	$h_{ав}$	0,00	0,00	0,00	0,00	-	39,5	26,8	15,6	9,5	-	0,00	0,00	0,00	0,00	15,7	39,5
	$h_{до}$	-	-	-	-	3,78	-	-	-	-	1,68	-	-	-	-	-	-
80,00	Процесс	s	s	s	s	ОВД ^{овв}	ОВД ^{ав}	ОВВ ^{ав}									
	$h_{ав}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,5	21,8	10,6	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,9	34,5
	$h_{до}$	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	-	-	-	-	-	-	-
106,00	Процесс	s	s	s	s	ОВД ^{овв}	ОВД ^{ав}	ОВВ ^{ав}									
	$h_{ав}$	0,00	0,00	0,00	0,00	5,13	-	-	-	2,73	1,8	-	-	-	-	-	-
	$h_{до}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
111,10	Процесс	s	s	s	s	ОВД ^{овв}	ОВВ ^{ав}										
	$h_{ав}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,94	-0,55	-	-	-	-	-	-	-0,38	4,47
	$h_{до}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Процесс	$h_{ав}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$h_{до}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$h_{овв}$	-	-	-	-	-	4,21	0,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Процесс	s	s	s	s	s	ОВД ^{овв}	ОВВ ^{ав}	s	s	s	s	s	s	s	s	s	

После формирования слоя с мобильным керосином с 23.05.2014 г. по 13.06.2014 г. выполнено опускание УВ до напора в поддоне $H = 114,5$ см. В процессе опускания УВ происходило ее вытекание через поддон. В скважине и колонне уровни слоя с мобильным керосином понижались и установились на глубинах: $H_{ao}^w = 110,1$; $H_{ow}^w = 132,4$ см. При этом мощность слоя уменьшилась в скважине с 28,3 до 22,4 см, а в колонне – с 14,6 до 8,6 см. Количество воды в песке колонны определено как баланс между количеством поданной и вытекшей воды, а также объемом воды, находящейся в скважине и пьезометрах. Учитывали также фактическое испарение воды из пьезометров, которые были открыты и где вода в пьезометрах соприкасалась с атмосферой. Испарение фиксировали в отдельной такой же трубке, как и в пьезометрах. Количество керосина в песке колонны определено как разность между первоначально поданным объемом и его объемом в скважине и пьезометрах. В конце опускания УВ в песке колонны по балансовым расчетам находилось $3172,8$ см³ воды и $1068,19$ см³ керосина.

По установившимся уровням H_{ao}^w , H_{ow}^w , H , H_{ow} на конец опускания УВ (13.06.2014 г.) выполнен расчет распределения керосина и воды в песке колонны, оценен их объем и состояние керосина вручную. Полученные результаты служили подтверждением правильности теоретических разработок и алгоритма вычислительной программы CFS (Calculation of Fluid Systems).

При установившемся уровне $H_{ao}^w = 110,1$ см в интервале глубин 110,1–103,0 см сформировалась трехфлюидная капиллярная зона «а – о – w», в которой происходил процесс основной ветки дренирования (ОВД) как полножидкостной насыщенности, так и воды в системе «о – w». Содержание жидкости (θ_ℓ) рассчитано по значениям h_{ao} при $\alpha_{ao}^d = 0,2710$; $\varepsilon_{ao}^d = 5,4434$; $m_{ao}^d = 0,8163$; $\theta_{\ell T}^{aow} = 0,0512$, а содержание воды θ_w – по значениям h_{ow} при $\alpha_{ow}^d = 0,3458$; $\varepsilon_{ow}^d = 3,652$; $m_{ow}^d = 0,7262$; $\theta_{wr}^{aow} = 0,0262$. Содержание керосина вычислено как разность между θ_ℓ и θ_w . Ниже уровня $H_{ao}^w = 110,1$ см сформировалась насыщенная система «о–w», в которой происходил процесс ОВД^{ow}. Содержание воды определено аналогично

h_{ow} , а содержание керосина рассчитано как разность между полным содержанием флюидов $\theta_s = 0,446$ и полученным содержанием воды.

Выше капиллярной зоны $H_{ao}^c = 103,0$ в песке сформировалась капиллярная зона воды с остаточным керосином, который остался после его стекания в течение 21 дня, когда производили понижение УВ до глубины 114,5 см. Содержание воды рассчитано по ОВД^{aw} по значениям h_{aw} при $\alpha_{aw}^d = 0,154$; $\varepsilon_{aw}^d = 5,67$; $m_{aw}^d = 0,824$; $\theta_{wr}^{aow} = 0,0262$. В интервале 0–20 см расчет θ_w выполнен по ОВД^{aw}, но с $\theta_{wr}^{aw} = 0,014$, так как эта зона находилась выше слоя с мобильным и капиллярным керосином. Количество остаточного керосина определено по графику его изменения во времени в течение трех месяцев после спуска воды и керосина из колонны в конце опыта (рис. 2). Как видно на рис. 2, количество остаточного керосина и воды уменьшается со временем стекания до стабильного состояния. Для песка данной колонны стабильное остаточное содержание для воды составляет 0,0262, а для керосина – 0,0250.

Остаточный керосин формировался в интервале глубин 20–103 см, верхний слой его – в течение всего периода опускания (21–22 дня), а нижний – на протяжении одного-двух дней. В связи с этим остаточное содержание керосина на глубине 20 см (см. рис. 2) составило 0,0284, а на глубине 100 см – 0,030. Между этими глубинами остаточное содержание керосина принято интерполяционно согласно прохождению мимо соответствующих глубин УВ.

Несовпадение рассчитанного и опытного объемов воды в песке колонны составляет 5,4, а керосина – 2,2%. Керосин в песке колонны распределился следующим образом (%): остаточный – 38,54; капиллярный в ненасыщенной зоне – 22,06; мобильный – 30,72; капиллярный в насыщенной зоне – 8,68*. При опускании УВ со сформировавшимся на нем слое с мобильным керосином количество последнего уменьшается за счет перехода его в остаточное состояние.

После опускания УВ произведен его подъем. В процессе подъема происходило уменьшение мощности слоя с мобильным керосином как в скважине, так и в песке колонны до его полного исчезновения в последнем при мощности в скважине 13,7 см (20.06.2014 г., см. рис. 1).

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

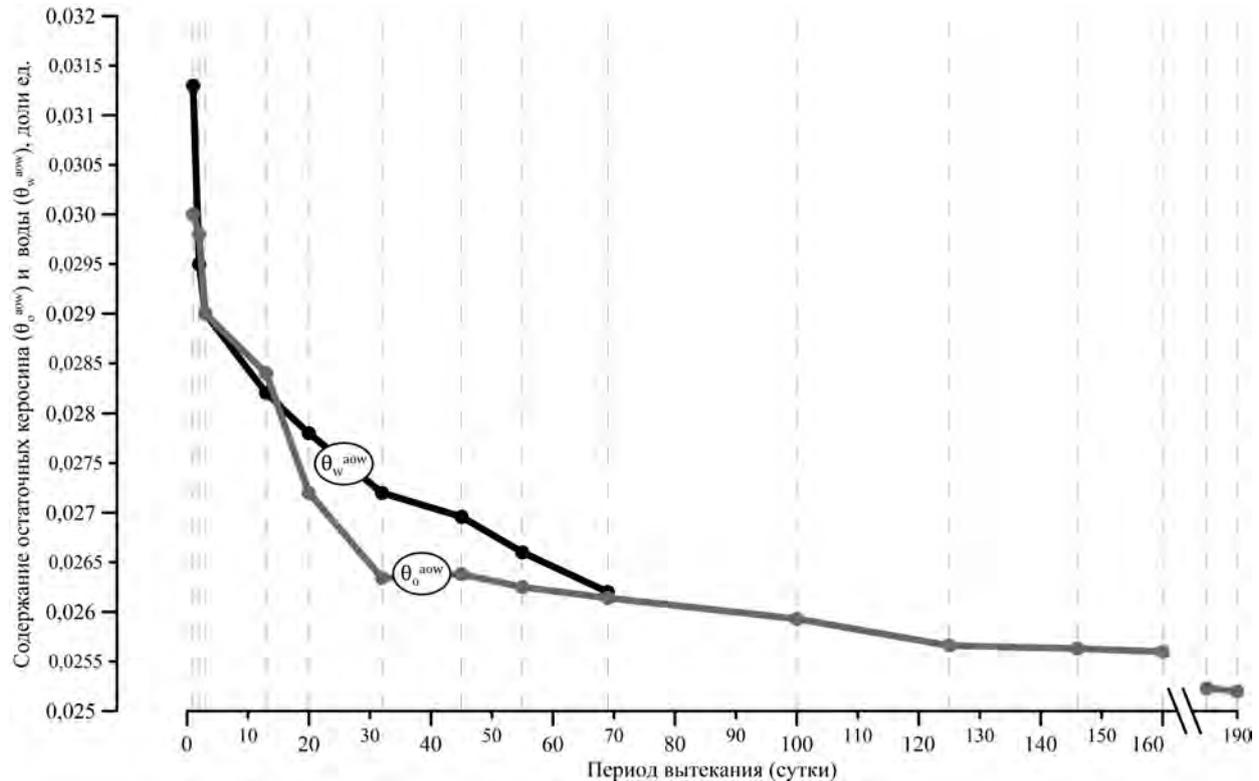


Рис. 2. Изменение во времени остаточных керосина θ_o^{aow} и воды θ_w^{aow} в процессе их стекания в песок после вытекания мобильных фаз

Fig. 2. Time change of remained kerosene θ_o^{aow} and water θ_w^{aow} during them flowing down in sand after mobile phase flowing out

Выше уровня $H_{ao}^w = 80,1$ см до глубины 77,0 см происходил процесс ОБВ в трехфлюидной системе «а – о – w». Рассчитано полножидкостное содержание по напорам h_{ao} при $\alpha_{ao}^i = 0,441$; $\epsilon_{ao}^i = 4,369$; $m_{ao}^i = 0,7711$ и $\theta_{lr} = 0,0512$. Содержание воды определено по $(h_{ow} - h^m)$ при $\alpha_{ow}^i = 0,5791$; $\epsilon_{ow}^i = 2,3796$; $m_{ow}^i = 0,5798$; $\theta_{ot,ow}^m = 0,0054$; $\theta_{wr}^{ow} = 0,009$ и $h^m = -1,5$ см. Выше в песке колонны стекание керосина наблюдалось еще в течение семи дней, что обусловило его остаточное содержание 0,0280 (см. рис. 2). Ниже $H_{ao}^w = 80,1$ см до глубины 100 см формировалась двухфлюидная насыщенная зона «о – w» с капиллярным керосином и происходил процесс ОБВ^{ow}. Расчет выполнен по $(h_{ow} - h^m)$ при вышеуказанных параметрах. В интервале глубин 100–125 см остался защемленный водой керосин $\theta_{ot,ow}^m = 0,0054$.

Несоответствие рассчитанного и опытного объемов воды в песке колонны составляет 2,0, а керосина – 1,4%. Керосин в песке колонны находился в виде (%): остаточного – 24,59; капиллярного в ненасыщенной зоне – 14,02; капиллярного в насыщенной зоне – 58,64; защемленного – 2,55.

При дальнейшем подъеме УВ до глубины 4,5 см весь керосин в песке колонны оказался защемленным водой с распределением, близким к тому, которое было зафиксировано на 20.06.2014 г. Ниже глубины 4,5 см песок был насыщен водой и защемленным керосином, поэтому содержание воды определено как $\theta_w = \theta_s - \theta_o$. В интервале глубин 0–4,5 см продолжался процесс ОБВ^{aw}. Содержание воды рассчитано по $h_{aw} = 4,5$ см при $\alpha_{aw}^i = 0,2507$; $\epsilon_{aw}^i = 4,03$; $m_{aw}^i = 0,7521$; $\theta_{aw}^m = 0,377$; $\theta_{wr} = 0,014$.

С 11.07.2014 г. по 28.07.2014 г. выполнено повторное опускание УВ. Керосин в скважине начал появляться при опускании УВ до глубины 12 см, и его мощность возрастала с увеличением глубины залегания опускающегося УВ. Мобильный керосин в песке колонны появился при мощности его в скважине $T_o^w = 13,7$ см. С дальнейшим опусканием УВ мощность керосина как в скважине, так и мобильного в песке колонны увеличивалась. Разница между ними оставалась постоянной и равной 13,7 см. При глубине $H = 114,5$ см опускание УВ было остановлено. Установились значения глубины уровней: $H_{ao}^w = 111,1$; $H_{ow}^w = 128,6$; $H_{ow} = 114,9$ см.

Как следует из таблицы, ниже уровня с глубиной залегания $H_{ao}^w = 111,1$ см в песке колонны происходил процесс первичной ветки дренирования (ПВД^{ow}) в системе «о – w». Расчет производили по напорам ($h_{ow} - h^m$) и параметрам ${}^d\alpha_{ow} = 0,2958$; ${}^d\epsilon_{ow} = 2,8797$; ${}^d m_{ow} = 0,6527$; $h^m = -1,5$ см; $\theta_{ot,ow}^m = 0,0054$; $\theta_{wt}^m = 0,0036$; $\theta_{wt}^{ow} = 0,009$. Ниже глубины 130,0 см песок полностью насыщен водой с $\theta_w = \theta_s = 0,446$ и $\theta_o = 0$.

В интервале глубин 111,1–106,0 см происходил процесс произвольной ветки дренирования (П₃ВД^{ao}) в системе «а – о – w». Выполнен расчет содержания жидкости $\theta_\ell = \theta_o + \theta_w$ по капиллярным напорам h_{ao} и параметрам ${}^d\alpha_{ao} = 0,2710$; ${}^d\epsilon_{ao} = 5,4434$; ${}^d m_{ao} = 0,8163$; $\theta_{tr}^{ao} = 0,0512$. Расчет содержания воды проведен по капиллярным напорам h_{ow} и параметрам ${}^d\alpha_{ow} = 0,3458$; ${}^d\epsilon_{ow} = 3,652$; ${}^d m_{ow} = 0,7262$; $\theta_{wt}^{ao} = 0,0252$. Содержание керосина определено как $\theta_o = \theta_\ell - \theta_w$.

В интервале глубин 0–106 см происходил процесс произвольной ветки дренирования воды (П₃ВД^{aw}) в системе «а – w», значения θ_w в котором рассчитаны по ранее указанным параметрам α_{aw}^d , ϵ_{aw}^d , m_{aw}^d , $i\theta_w^m$. Кроме того, происходило гравитационное стекание керосина, остаточное содержание которого определено по графику (см. рис. 2) в пределах 0,0258–0,0278.

Керосин в песке колонны находился в состоянии (%): остаточного – 32,97; капиллярного ненасыщенного – 26,34; мобильного – 28,30; капиллярного насыщенного – 12,39.

Обсуждение результатов

Выполненное физическое моделирование влияния опускания УВ на состояние мобильного керосина в пористой среде после формирования его слоя показало, что уменьшение его мощности происходит за счет формирования остаточного легкого нефтепродукта (ЛНП), который удерживается грунтом после гравитационного стекания. Величина уменьшения до полного исчезновения зависит от первоначальной мощности слоя, величины и времени снижения УВ. Максимальное понижение УВ (ΔH_{max}), при котором весь мобильный ЛНП перейдет в остаточный, определено по формуле:

$$\Delta H_{max} = \frac{\sum_{i=1}^k (\theta_{oi} - \theta_{or}^{ao}) m_i}{\theta_{or}^{ao}}, \quad (1)$$

где θ_{oi} , m_i – содержание мобильного и капиллярного ЛНП с $\theta_o > \theta_{or}^{ao}$ в слое мощностью m_i ;

θ_{or}^{ao} – наименьшее содержание ЛНП в трехфлюидной системе «а – о – w» в условиях дренирования (принимается θ_{or}^{ao} , так как при первичном опускании УВ двухфлюидная система «о – w» переходит в трехфлюидную систему «а – о – w»).

В данной опытной колонне со сформировавшимся слоем мобильного керосина 14,6 см последний исчезнет при опускании УВ на глубину

$$\Delta H_{max} = \frac{(0,033 - 0,025) \times 5,0 + (0,2163 - 0,025) \times 4,6 + (0,3440 - 0,025) \times 5,4 + (0,2377 - 0,025) \times 9,2 + (0,0947 - 0,025) \times 5,8}{0,025} = 200 \text{ см.}$$

Так как колонна имела меньшую высоту, то УВ был опущен на $\Delta H = 84,5$ см до глубины 114,5 см. При этом мощность слоя с мобильным керосином уменьшилась до 8,6 см, т. е. на $\Delta T_o = 6,0$ см, что близко к рассчитанному уменьшению мощности слоя (ΔT_o):

$$\Delta T_o = \frac{T_o \times \Delta H}{\Delta H_{max}} = \frac{14,6 \times 84,5}{200} = 6,17 \text{ см.} \quad (2)$$

Таким образом, имея исходную измеренную мощность слоя с мобильным ЛНП, а также замеренное лабораторным способом или рассчитанное распределение содержания ЛНП с известным θ_{or}^{ao} , можем по формуле (1) определить максимальное понижение УВ (ΔH_{max}), при котором слой мобильного ЛНП исчезнет, а по формуле (2) – уменьшение слоя с мобильным ЛНП при понижении УВ на $\Delta H < \Delta H_{max}$.

Если после первичного опускания УВ происходит его подъем, то мощность слоя с мобильным ЛНП быстро сокращается, даже до полного исчезновения, так как ЛНП расходуется на формирование новых капиллярных зон выше и ниже слоя с мобильным ЛНП, первая из которых вытесняет воздух из вышележащего пористого пространства. Выше капиллярной зоны «а – о – w», где $h_{aw} \geq h_{ow}$, будет продолжаться процесс впитывания воды. Так как над капиллярной зоной h_{ao}^c формируется капиллярная зона h_{aw}^c , то содержание воды рассчитывается по h_{aw} соответствующих веток впитывания (ОВВ^{aw}, ПЗВВ^{aw} и ПрВВ^{aw}). Изменение во времени содержания ЛНП при гравитационном стекании можно получить опытным путем (как в нашем случае) или моделированием соответствующих условий, используя программные пакеты, моделирующие

вертикальное передвижение воды и ЛНП в насыщенной и ненасыщенной пористой среде в пределах максимальной амплитуды колебания УГВ.

Ниже вновь сформированной насыщенной капиллярной зоны остается остаточный ЛНП системы «о – w» ($m\theta_{wt}^{ow}$) на всем пути передвижения слоя с мобильным ЛНП, который защемляется водой. Определяют $m\theta_{wt}^{ow}$ лабораторным путем, получая зависимость $h_{ow}(\theta_w)$ для ОВД^{ow} и ОВВ^{ow} [Огняник, Парамонова, Ст. 2, 2016б].

При мощности слоя ЛНП в скважине $T_o^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$ (в нашем примере 13,7 см) слой мобильного ЛНП в пористой среде исчезает при сформированных капиллярных зонах. При дальнейшем подъеме УВ в ранее сформированных капиллярных зонах ЛНП защемляется водой, т. е. весь ЛНП в пористой среде переходит в неподвижное защемленное состояние (10.07.2014 г.).

В процессе повторного опускания УВ происходит разгерметизация защемленного ЛНП, процесс произвольной ветки дренирования воды (П₃ВД^{aw}) и гравитационное стекание разгерметизированного ЛНП. Нами экспериментально определено, что количество нового остаточного ЛНП зависит от времени стекания и стремится к постоянной величине, при которой стекание прекращается.

Стекший ЛНП накапливается над УВ, формируя капиллярную зону «а – о – w», в которой локально возникает полностью насыщенное состояние, дренируемое скважиной. Когда мощность слоя ЛНП в скважине достигает $T_o^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$, в пористой среде начинает формироваться слой мобильного ЛНП.

При опускании УВ ниже глубины, где содержание защемленного ЛНП меньше или равно θ_{or}^{aow} , мобильный ЛНП начнет снова расходоваться на создание остаточного содержания, а мощность слоя с мобильным ЛНП начнет снова уменьшаться.

Если УВ повторно поднимается, то слой с мобильным ЛНП тоже начинает более интенсивно уменьшаться вследствие формирования новых капиллярных зон, ЛНП в которых опять защемляется водой при дальнейшем подъеме УВ. Это наглядно видно при проведении опыта по определению процентного содержания мобильного керосина в песке колонны: после

формирования слоя на 23.05.2014 г. – 71,75%; при опускании УВ до 114,5 см на 13.06.2014 г. – 30,72%; при подъеме УВ до 84,50 см на 20.06.2014 г. – 0%; при подъеме УВ до 4,5 см на 10.07.2014 г. – 0% (весь ЛНП защемлен водой); при опускании УВ до 114,5 см на 28.07.2014 г. – 28,3%.

Выводы

1. Колебание УГВ влияет на распределение и состояние ЛНП в геологической среде. Образуются и переходят друг в друга системы «воздух – вода» («а – w»), «воздух – ЛНП – вода» («а – о – w»), «ЛНП – вода» («о – w»).

2. В процессе подъема УГВ происходит процесс впитывания (ОВВ^{aw}, ПрВВ^{aw}, П₃ВВ^{aw}, ОВВ^{ow}, П₃ВВ^{ow}, ПрВВ^{ow}, ОВВ^{aow}, П₃ВВ^{aow}), а при опускании – процесс дренирования (ОВД^{aw}, ОВД^{ow}, ПВД^{ow}, ПрВД^{ow}, ОВД^{aow}, П₃ВД^{aow}, П₃ВД^{aw}, П₃ВД^{ow}). По каждой из ветвей насыщения разработана теоретическая база расчета θ_w и θ_o по h_{aw} , h_{ow} и h_{ao} , а также h_{aw} , h_{ow} и h_{ao} по известным θ_w и θ_o из работ [Огняник, Парамонова, Ст. 1–3, 2016а–в].

3. Разработан алгоритм программы CFS, по которой выполнен расчет θ_w и θ_o на основе режимных наблюдений глубин залегания уровней ЛНП и воды в скважине [Парамонова, Гамшева, Запольский, 2016б].

4. Проведенные лабораторные опыты с первоначальным подъемом напора воды [Парамонова и др., Ст. 1, 2017] и первоначальным его опусканием после формирования слоя с мобильным ЛНП (данная статья) показали следующее:

– слой с мобильным ЛНП существует в пористой среде при $T_o^w = \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$;

– мощность слоя с мобильным керосином сокращается (может до полного исчезновения) при первоначальном подъеме и опускании УВ. При подъеме УВ уменьшение мощности слоя происходит более интенсивно, так как ЛНП расходуется на создание нового слоя с мобильным ЛНП и новых капиллярных зон, оставляя после себя защемленный водой ЛНП. При снижении УВ мощность слоя падает менее интенсивно, поскольку расходуется на остаточный ЛНП, который удерживается грунтом после гравитационного стекания. Количество остаточных ЛНП уменьшается во времени и стремится к минимальному значению θ_{or}^{aow} , определяемому опытным путем;

– в процессе опускания УВ после его первоначального поднятия мобильный и капиллярный ЛНП дренируются, оставляя за собой остаточный ЛНП, который скапливается над УВ, образуя сначала новые капиллярные зоны, а

при $T_o^w > \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$ – новый слой мобильного ЛНП,

объем которого меньше, чем в первоначально сформированном слое;

– в процессе подъема УВ после его первоначального опускания мощность слоя с мобильным ЛНП быстро сокращается (может до полного исчезновения). Выше вновь сформированной ненасыщенной капиллярной зоны «а – о – w» будет продолжаться процесс гравитационного стекания ЛНП, если время между разнонаправленным передвижением УВ будет меньше времени установления θ_{of}^{aow} ;

– при дальнейших подъемах и опусканиях УВ процессы пространственной трансформации ЛНП будут повторяться, пока амплитуда колебания УВ не достигнет ΔH_{max} , вычисленного по формуле (1);

– проведенные расчеты содержания в песке опытных колонн в процессе колебания УВ показали, что рассчитанные на основании теоретической базы и алгоритма расчетов объема воды и керосина близки (до 5%) к замеренным опытным путем. Это указывает на достаточную для практики точность расчетов и достоверность теоретического обоснования и вычислительного алгоритма. Выполненные расчеты также послужат основой для оценки правильности расчетов по разрабатываемой программе CFS.

Список литературы / References

1. **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.* 2016а. № 2 (355). С. 90–98.

Ognianik N.S., Paramonova N.K., 2016a. 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).

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. 2. Теоретическая база расчета двухфлюидной системы «легкие нефтепродукты – вода» в пористой среде. *Геол. журн.* 2016б. № 3 (356). С. 89–103.

Ognianik N.S., Paramonova N.K., 2016b. 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).

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. 3. Теоретическая база расчета трехфлюидной системы «воздух – легкие нефтепродукты – вода» в пористой среде. *Геол. журн.* 2016в. № 4 (357). С. 87–102.

Ognianik N.S., Paramonova N.K., 2016с. 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).

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

Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolski I.N., Logvinenko O.I., Negoda Y.A., 2016a. Influence of water table fluctuations on formation of retained and trapped light petroleum products. *Geologichnyy zhurnal*, № 1 (354), p. 112–124 (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.* 2016б. № 4 (357). С. 103–114.

Paramonova N.K., Gamsheyeva I.S., Zapolskiy I.N., 2016b. 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).

6. **Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И.** Лабораторные исследования влияния колебания уровня грунтовых вод на состояние и содержание легких нефтепродуктов в геологической среде. Ст. 1. Проведение опыта с первоначальным подъемом уровня грунтовых вод после формирования слоя с мобильным легким нефтепродуктом. *Геол. журн.* 2017. № 3 (360). С. 42–54.

Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolskiy I.N., Logvinenko O.I., 2017. Laboratory study of groundwater table fluctuations influence on light petroleum product state and content. Paper 1. Experiment with initial groundwater table raising after formation of mobile light petroleum product lay. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (360), p. 42–54 (in Russian).

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

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

Статья поступила

15.02.2017