

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

Статья 4. Порядок расчета и анализа флюидных систем
в загрязненной легкими нефтепродуктами геологической среде
в процессе колебания уровня грунтовых вод

Н.К. Парамонова¹, И.С. Гамшеева², И.Н. Запольский³

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

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

² *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: ari_gm@mail.ru
Главный специалист.*

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

Изложен алгоритм вычислительной программы CFS (Calculation of Fluid Systems), предназначенной для расчета уровней, состояния, распределения содержания и объема воды и жидких легких нефтепродуктов в линзе, сформировавшейся на уровне грунтовых вод в условиях его колебания. Состоит из блоков: ввод данных, преобразование параметров, расчет значений и формирование массивов исходных переменных по датам, идентификация и расчет флюидной системы, анализ и уточнение расчетов, выделение зон с различным состоянием жидких легких нефтепродуктов, формирование массива значений содержания воды и жидких легких нефтепродуктов, обработка выходных данных и расчет изменения объема воды и легких нефтепродуктов по вертикали в зоне колебания уровня грунтовых вод, вывод таблиц и результатов на выбранные даты в файл.

Ключевые слова: алгоритм вычислительной программы, массивы исходных параметров и переменных, идентификация и расчет флюидных систем, содержание и объем воды и легких нефтепродуктов, колебание уровня грунтовых вод.

THE 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

N.K. Paramonova¹, I.S. Gamsheeva², I.N. Zapolskiy³

(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: ari_gm@mail.ru
Chief specialist.*

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

© Н.К. Парамонова, И.С. Гамшеева, И.Н. Запольский, 2016

The article describes an algorithm for CFS (Calculation of Fluid Systems) computer program designed to calculate levels, state, distribution of content and volume of water and liquid light petroleum products in a lens formed on a water table during its fluctuations. The program consists of the blocks: data input, parameter transformation, value calculation and formation of input variable arrays on dates, identification and calculation of fluid system, analysis and correction of calculations, selection of zones with different states of liquid light petroleum products, formation of the array of water content and light petroleum products values, treatment of output data and calculation of changes in water and light petroleum products volumes vertically in a water table fluctuation zone, output of tables and results for chosen dates in a file.

Key words: algorithm of computer program, arrays of initial parameters and variables, identification and calculation of fluid systems, content and volume of water and light petroleum products, fluctuations of water table.

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

**Стаття 4. Порядок розрахунку та аналізу флюїдних систем
у забрудненому легкими нафтопродуктами геологічному середовищі
у процесі коливання рівня ґрунтових вод**

Н.К. Парамонова¹, І.С. Гамшеєва², І.М. Запольський³

(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: ari_gm@mail.ru
Головний фахівець.*

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

Викладено алгоритм обчислювальної програми CFS (Calculation of Fluid Systems), призначеної для розрахунку рівнів, стану, розподілу вмісту та об'єму води й рідких легких нафтопродуктів у лінзі, що сформувалася на рівні ґрунтових вод в умовах його коливання. Складається з блоків: уведення даних, перетворення параметрів, розрахунок значень і формування масивів вихідних змінних за датами, ідентифікація і розрахунок флюїдної системи, аналіз та уточнення розрахунків, виокремлення зон с різним станом рідких легких нафтопродуктів, формування масиву значень вмісту води й легких нафтопродуктів, обробка вихідних даних і розрахунок зміни об'єму води й легких нафтопродуктів по вертикалі у зоні коливання рівня ґрунтових вод, виведення таблиць і результатів на вибрані дати у файл.

Ключові слова: алгоритм обчислювальної програми, масиви вихідних параметрів та змінних, ідентифікація та розрахунок флюїдних систем, вміст та об'єм води і легких нафтопродуктів, коливання рівня ґрунтових вод.

Введение

Программа CFS (Calculation of Fluid Systems) предназначена для расчета изменения состояния, распределения содержания и объема воды и жидких легких нефтепродуктов (ЛНП) в линзе, сформировавшейся на уровне грунтовых вод (УГВ) в условиях его колебания по данным наблюдения в скважине.

Теоретической базой вычислительной программы служили теоретические разработки, изложенные в работах [Огняник и др., 2006; Парамонова и др., 2016; Огняник, Парамонова, 2016а–в]. Порядок идентификации, расчета и анализа возникающих при колебании УГВ флюидных систем (алгоритм вычислительной программы) показан на блок-схеме (рис. 1). Ниже приведено описание каждого блока алгоритма программы.

Блок 1. Ввод данных

А. Ввод дат. Вводятся даты, на которые зафиксированы глубины уровней в скважине (режимные наблюдения).

Б. Ввод глубин (z). Вводятся глубины, на которых желательно выполнить расчеты. Включается диапазон колебания УГВ плюс мощность слоя с мобильным ЛНП с выходом в насыщенную грунтовой водой зону и в незагрязненную нефтепродуктами зону аэрации (ЗА).

В. Ввод глубин уровней в скважине. По датам вводятся:

H_{ao}^w – глубина раздела «воздух – ЛНП»;

H_{ow}^w – глубина раздела «ЛНП – вода», где a – воздух, o – ЛНП, w – вода; H – глубина залегания УГВ при отсутствии слоя с мобильным ЛНП (H_{ao}^w и H_{ow}^w отсутствуют).

Г. Ввод параметров:

ρ_w – плотность воды, г/см³ или т/м³;

ρ_o – плотность ЛНП, г/см³ или т/м³;

σ_{aw} – поверхностное натяжение границы раздела «воздух – вода», дин/см;

σ_{ao} – поверхностное натяжение границы раздела «воздух – ЛНП», дин/см;

σ_{ow} – поверхностное натяжение границы раздела «ЛНП – вода», дин/см;

α_{aw}^d – параметр уравнения VG процесса дренирования воды в системе « $a-w$ », 1/см или 1/м;

α_{ow}^d – параметр уравнения VG процесса дренирования воды в системе « $o-w$ », 1/см или 1/м (если неизвестен, то рассчитывается по α_{aw}^d);

α_{ao}^d – параметр уравнения VG процесса дренирования ЛНП в системе « $a-o$ », 1/см или 1/м (если неизвестен, то рассчитывается по α_{aw}^d);

α_{aw}^i – параметр уравнения VG процесса впитывания воды в системе « $a-w$ », 1/см или 1/м;

α_{ow}^i – параметр уравнения VG процесса впитывания воды в системе « $o-w$ », 1/см или 1/м (если неизвестен, то рассчитывается по α_{aw}^i);

α_{ao}^i – параметр уравнения VG процесса впитывания ЛНП в системе « $a-o$ », 1/см или 1/м (если неизвестен, то рассчитывается по α_{aw}^i);

$\alpha_{ow}^{d'}$ – параметр уравнения VG первичной ветки дренирования воды в системе « $o-w$ », 1/см или 1/м;

ϵ_{aw}^d – параметр уравнения VG процесса дренирования воды в системе « $a-w$ », б. р.;

ϵ_{ow}^d – параметр уравнения VG процесса дренирования воды в системе « $o-w$ », б. р.;

ϵ_{ao}^d – параметр уравнения VG процесса дренирования ЛНП в системе « $a-o$ », б. р.;

$\epsilon_{ow}^{d'}$ – параметр уравнения VG первичной ветки дренирования воды в системе « $o-w$ », б. р.;

ϵ_{aw}^i – параметр уравнения VG процесса впитывания воды в системе « $a-w$ », б. р.;

ϵ_{ow}^i – параметр уравнения VG процесса впитывания воды в системе « $o-w$ », б. р.;

ϵ_{ao}^i – параметр уравнения VG процесса впитывания ЛНП в системе « $a-o$ », б. р.;

θ_s – полная насыщенность флюидами, д. ед.;

θ_{wr}^{aw} – наименьшее содержание непрерывной фазы воды в системе « $a-w$ », д. ед.;

θ_{wr}^{aow} – наименьшее содержание остаточной воды при дренировании системы « $a-o-w$ », д. ед.;

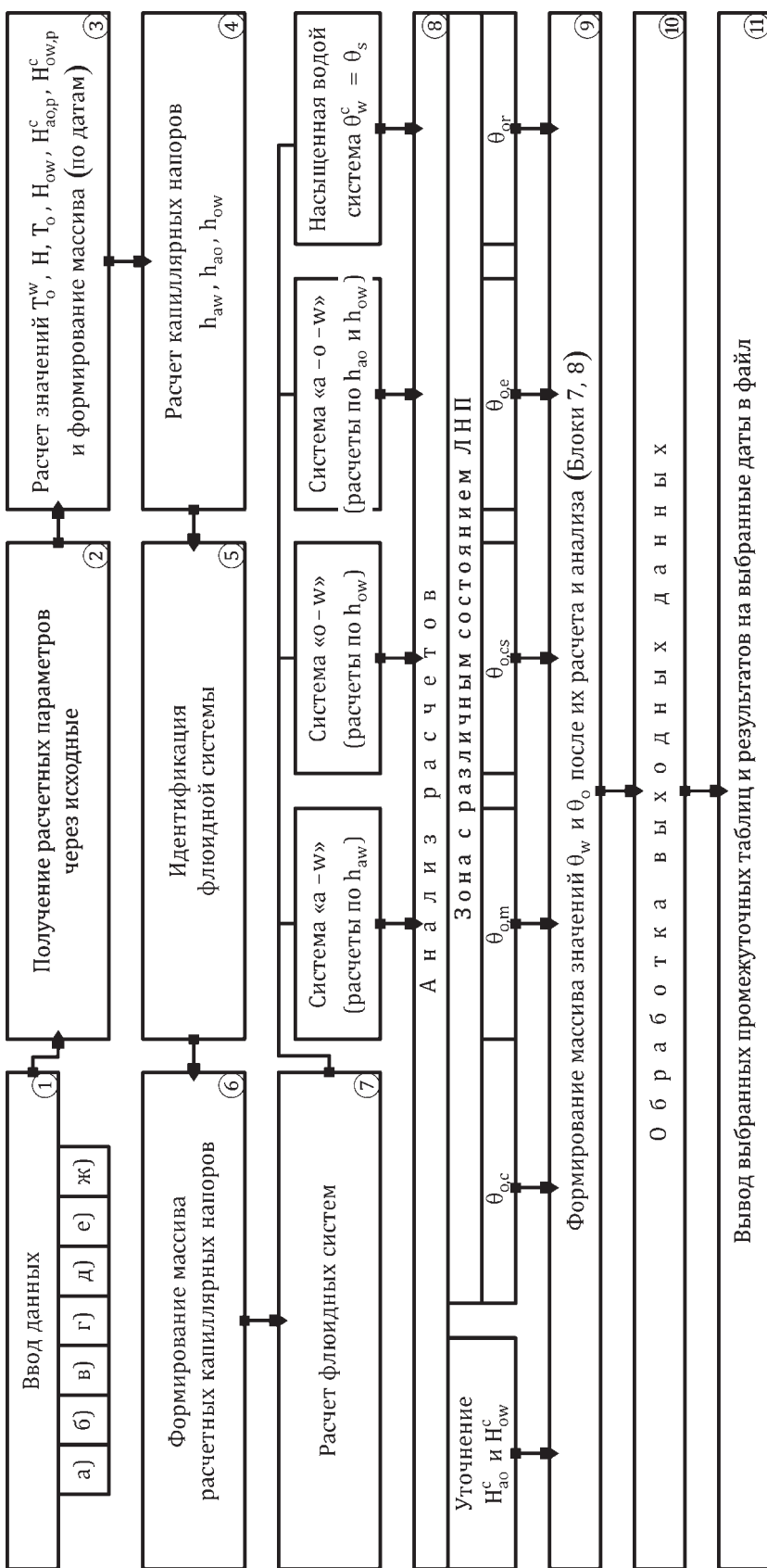


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы CFS

а) ввод дат; б) ввод глубин (z); в) ввод глубин уровней в скважине; г) ввод массива известных остаточного содержания ЛПП в ЗА на периоды времени; е) ввод массива изменяющихся во времени остаточных ЛПП и воды в процессе стекания в системе «а - о - w» при максимальной амплитуде колебания УГВ; ж) ввод дат начала процессов трансформации мобильного ЛПП

Fig. 1. The block diagram of CFS program algorithm

a) date input; b) depth input (z); c) input of level depths in a well; d) parameter input; e) input of known residual LPP content in the unsaturated zone for time periods; f) input of the massive of changing in time residual LPP and water during draining in a «a - o - w» system at the maximum amplitude of water table fluctuations; g) data input of starting of mobile LPP transformation processes

θ_{or}^{aow} – наименьшее содержание недренируемого остаточного ЛНП при дренировании системы «а – о – w», д. ед.;

$\theta_{1r}^{aow} = \theta_{wr}^{aow} + \theta_{or}^{aow}$ – наименьшее содержание остаточной жидкости при дренировании системы «а – о – w», д. ед.;

θ_{or}^{ao} – наименьшее содержание непрерывной фазы ЛНП в системе «а – о», д. ед.;

θ_{wr}^{ow} – наименьшее содержание непрерывной фазы воды в системе «о – w», д. ед.;

$i\theta_{w,aw}^m$ – максимальное содержание воды в процессе основной ветки впитывания в системе «а – w» (ОВВ^{aw}), д. ед.;

$i\theta_{w,ow}^m$ – максимальное содержание воды в процессе основной ветки впитывания в системе «о – w» (ОВВ^{ow}), д. ед.;

$i\theta_{o,ao}^m$ – максимальное содержание ЛНП в процессе основной ветки впитывания в системе «а – о» (ОВВ^{ao}), д. ед.;

$\theta_{w,i}^d - h_{aw,i}$, $\theta_{w,i}^d - h_{ow,i}$ – значения θ_w при соответствующих значениях $h_{aw,i}$ и $h_{ow,i}$ в процессе основной ветки дренирования ОВД;

$\theta_{w,i}^i - h_{aw,i}$, $\theta_{w,i}^i - h_{ow,i}$ – то же в процессе основной ветки впитывания ОВВ;

h^m – минимальный отрицательный капиллярный напор (h_{ow}) в системе «о – w»;

T – время стабилизации θ_{wr}^{aow} и θ_{or}^{aow} при максимальном понижении УГВ.

Д. Ввод массива известного остаточного содержания ЛНП ($\theta_{o,p}$) в ЗА по глубинам z_i на периоды времени с ... до ...: $z_i - \theta_{o,p_i}$.

Е. Ввод массива изменяющихся во времени ($\Delta t_i = t_n - t_i$, где t_n – начальное время стекания) остаточных ЛНП и воды в процессе эксперимента стекания в системе «а – о – w» при максимальной амплитуде колебания УГВ:

$$\Delta t_1 \rightarrow \theta_{wr,t_1}^{aow} \div \theta_{or,t_1}^{aow}; \Delta t_2 \rightarrow \theta_{wr,t_2}^{aow} \div \theta_{or,t_2}^{aow} \dots \rightarrow \\ \rightarrow \Delta t_k = T \rightarrow \theta_{wr,const}^{aow} \div \theta_{or,const}^{aow}$$

Ж. Ввод дат начала процессов трансформации мобильного ЛНП: формирования слоя с мобильным ЛНП; первого подъема УГВ; последующего опускания УГВ; повторного подъема УГВ; первого опускания УГВ после формирования слоя с мобильным ЛНП.

Блок 2. Получение расчетных параметров через исходные

$$\tilde{\theta}_{wr}^{aw} = \frac{\theta_{wr}^{aw}}{\theta_s}; \tilde{\theta}_{wr}^{ow} = \frac{\theta_{wr}^{ow}}{\theta_s}; \tilde{\theta}_{or}^{ao} = \frac{\theta_{or}^{ao}}{\theta_s};$$

$$i\tilde{\theta}_{w,aw}^m = \frac{i\theta_{w,aw}^m - \theta_{wr}^{aw}}{\theta_s - \theta_{wr}^{aw}};$$

$$i\tilde{\theta}_{w,ow}^m = \frac{i\theta_{w,ow}^m - \theta_{wr}^{ow}}{\theta_s - \theta_{wr}^{ow} - \theta_{ot}^m}; i\tilde{\theta}_{o,ao}^m = \frac{i\theta_{o,ao}^m - \theta_{or}^{ao}}{\theta_s - \theta_{or}^{ao}};$$

$$R_{aw} = \frac{1}{1 - i\tilde{\theta}_{at,aw}^m} - 1; R_{ow} = \frac{1}{1 - i\tilde{\theta}_{ot,ow}^m} - 1;$$

$$R_{ao} = \frac{1}{1 - i\tilde{\theta}_{at,ao}^m} - 1;$$

$$\theta_{at,aw}^m = \theta_s - i\theta_{w,aw}^m; \bar{\theta}_{at,ao}^m = 1 - i\bar{\theta}_{o,ao}^m;$$

$$\bar{\theta}_{ot,ow}^m = 1 - i\bar{\theta}_{w,ow}^m; \theta_{ot,ow}^m = \theta_s - i\theta_{w,ow}^m;$$

$$\bar{\theta}_{at,aw}^m = 1 - i\bar{\theta}_{aw}^m; \theta_{at,ao} = \theta_s - i\theta_{o,ao}^m;$$

$$\beta_{ao} = \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{ao}}; \beta_{ow} = \frac{\sigma_{aw}}{\sigma_{ow}}; d m_{aw} = 1 - \frac{1}{d \varepsilon_{aw}};$$

$$i m_{aw} = 1 - \frac{1}{i \varepsilon_{aw}}; d m_{ao} = 1 - \frac{1}{d \varepsilon_{ao}}; i m_{ao} = 1 - \frac{1}{i \varepsilon_{ao}};$$

$$d m_{ow} = 1 - \frac{1}{d \varepsilon_{ow}}; i m_{ow} = 1 - \frac{1}{i \varepsilon_{ow}};$$

$$d' m_{ow} = 1 - \frac{1}{d' \varepsilon_{ow}}; \rho_{r,o} = \frac{\rho_o}{\rho_w};$$

$$h_d^{aw} = d \alpha_{aw}^{-1} S_x^{1/\lambda} \left(S_x^{-\frac{1}{d} m_{aw}} \right)^{1-d m_{aw}};$$

$$S_x = 0,72 - 0,35 \times 2,7183^{-d \varepsilon_{aw}^4};$$

$$\lambda = \frac{d m_{aw} \left(1 - 0,5^{\frac{1}{d m_{aw}}} \right)}{1 - d m_{aw}};$$

$$h_d^{ao} = \frac{h_d^{aw} \times \sigma_{ao}}{\sigma_{aw}}; h_d^{ow} = \frac{h_d^{aw} \times \sigma_{ow}}{\sigma_{aw}}.$$

Блок 3. Расчеты значений T_o^w , H , T_o , H_{ow} , $H_{ao,p}^c$, $H_{ow,p}^c$ и формирование массива (по датам)

- мощность слоя ЛНП в скважине:

$$T_o^w = H_{ow}^w - H_{ao}^w;$$

- глубина залегания напора воды:

$$H = H_{ow}^w - \rho_{r,o} T_o^w;$$

- мощность слоя ЛНП в породе:

$$T_o = T_o^w - h_d^{ao} / (1 - \rho_{r,o});$$

$$T_o = 0 \text{ при } T_o^w \leq \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}};$$

- глубина залегания уровня «ЛНП – вода» в породе: $H_{ow} = H_{ao}^w + T_o$;

- предварительная глубина залегания капиллярной каймы «воздух – ЛНП»:

$$H_{ao,p}^c = \frac{\beta_{ao} \rho_{r,o} H_{ao}^w - H}{\beta_{ao} \rho_{r,o} - 1};$$

- предварительная глубина залегания капиллярной каймы «ЛНП – вода»:

$$H_{ow,p}^c = H_{ow}^w - \frac{h_d^{ow}}{1 - \rho_{r,o}}.$$

Значения H_{ao}^w , H_{ow}^w вводятся в расчетные глубины z .

Блок 4. Расчет капиллярных напоров h_{aw} , h_{ao} , h_{ow}

$$h_{aw} = H - z; h_{ao} = \rho_{r,o} (H_{ao}^w - z);$$

$$h_{ow} = (1 - \rho_{r,o}) (H_{ow}^w - z).$$

Блок 5. Идентификация флюидной системы

Анализ проводится для каждого z по всем датам:

а) если $h_{aw} > h_{ao} > h_{ow} > 0$, то это система «а – w», и в Блок 6 вводятся только значения h_{aw} ; при опускании УГВ, если на предыдущем времени было полное насыщение водой с заземленным θ_o , то в Блок 6 вводятся значения h_{aw} и h_{ow} , а система представляет собой кажущуюся «а – w» и «о – w»;

б) если $h_{ao} \leq 0$ при $h_{ow} > h^m$, то это система «о – w», и в Блок 6 вводятся значения $h_{aw} = 0$ и h_{ow} ;

в) если $0 < h_{ao} < h_{ow}$, то это система «а – о – w», и в Блок 6 вписываются значения h_{ao} и h_{ow} ;

г) если $h_{aw} \leq 0$, $h_{ao} < 0$, $h_{ow} < h^m$, то принимается $h_{aw} = 0$ – система насыщена водой ($\theta_w^c = \theta_s$); в Блок 6 в строку «Процесс флюидной системы» вписывается «s».

Блок 6. Формирование массива расчетных капиллярных напоров

Для каждой глубины и даты записываются значения капиллярных напоров h_{aw} , h_{ao} , h_{ow} и определяется система «а – w», «а – о», «о – w» на основе анализа в Блоке 5. Для каждой системы устанавливается ветка дренирования или впитывания на основе идентификации, описанной в статьях [Огняник, Парамонова, 2016а–в]: для системы «а – w» – основная ветвь дренирования (ОВД^{aw}), основная ветвь впитывания (ОВВ^{aw}), промежуточная ветвь впитывания (ПрВВ^{aw}), произвольная ветвь дренирования (ПзВд^{aw}), произвольная ветвь впитывания (ПзВВ^{aw}); для системы «о – w» – основная ветвь дренирования (ОВД^{ow}), основная ветвь впитывания (ОВВ^{ow}), промежуточная ветвь впитывания (ПрВВ^{ow}), промежуточная ветвь дренирования (ПрВд^{ow}), первичная ветвь дренирования (Пвд^{ow}), произвольная ветвь дренирования (ПзВд^{ow}), произвольная ветвь впитывания (ПзВВ^{ow}); для системы «а – о – w» – основная ветвь дренирования (ОВд^{ao}_ℓ, ОВД^{ao}_w), основная ветвь впитывания (ОВВ^{ao}_ℓ, ОВВ^{ao}_w), произвольная ветвь дренирования (ПзВд^{ao}_ℓ, ПзВд^{ao}_w), произвольная ветвь впитывания (ПзВВ^{ao}_ℓ, ПзВВ^{ao}_w), для жидкости (ℓ) по h_{ao} , для воды (w) по h_{ow} .

Блок 7. Расчет флюидных систем

Расчет производится по капиллярным напорам соответствующей ветки насыщения с помощью расчетного блока программы **CFS**, составленного на основании формул, приведенных в статье [Огняник, Парамонова, 2016а–в].

а) h_{aw} – двухфлюидная «а – w» система: ветки насыщения – ОВД, ОВВ, ПрВВ, ПзВд, ПзВВ;

б) h_{ow} – двухфлюидная «о – w» система: ветки насыщения – ОВД, ОВВ, ПрВВ, ПрВд, Пвд, ПзВд, ПзВВ;

в) h_{ao}, h_{ow} – трехфлюидная «а – о – w» система: ветки насыщения – ОВД, ОВВ, ПзВД, ПзВВ для «ℓ» и «w»;

г) $h_{aw} \leq 0, h_{ao} < 0$ и $h_{ow} < h^m$ – насыщенная водой система, расчетное содержание воды $\theta_w^c = \theta_s$;

д) h_{aw}, h_{ow} – кажущаяся «а – w» система: отдельно рассчитываются ветки насыщения по h_{aw} и h_{ow} . По h_{aw} рассчитывается кажущееся содержание воды θ_w^a , граничащей с воздухом и включающей заземленный ЛНП. По h_{ow} рассчитывается количество воды, связанной с ЛНП (θ_w^{ow}). Тогда остаточное содержание ЛНП определяется как $\theta_{ог} = \theta_w^{aw} - \theta_w^{ow}$.

На основании расчетов определяется содержание ЛНП (θ_o) и содержание воды

(θ_w), которые анализируются в Блоке 8. Если по каким-либо веткам насыщения известны капиллярные напоры и содержание флюида(-ов), то определяются или корректируются параметры уравнения VG α и ε [Огняник, Парамонова, 2016а–в]).

Блок 8. Анализ расчетов

Анализ расчетов проводится для установления количества воды и ЛНП и состояния ЛНП в ГС с уточнением глубины залегания границ H_{ao}^c и H_{ow}^c – капиллярных зон «воздух – ЛНП» и «ЛНП – вода».

① Формирование слоя с мобильным ЛНП (появление в массивах Блока 3 значений T_o и H_{ow}). Схема анализа расчетов Блока 7 показана на рис. 2.

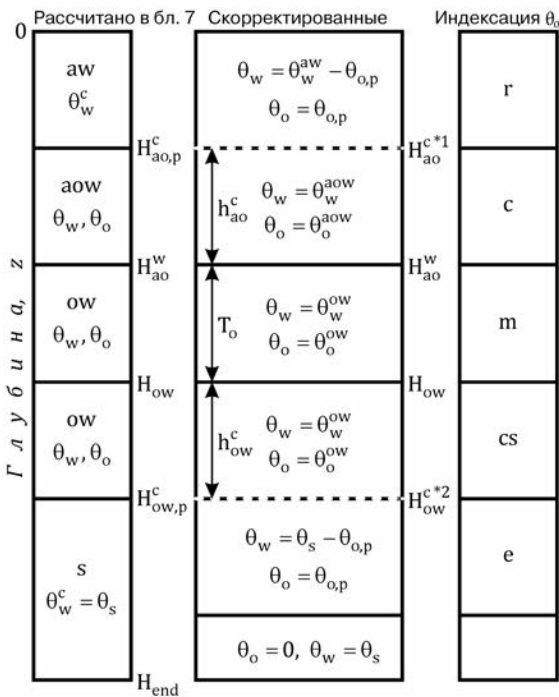


Рис. 2. Схема анализа расчетов Блока 7 для периода формирования слоя с мобильным ЛНП
Флюидные системы: aw – «воздух – вода»; ow – «ЛНП – вода»; aow – «воздух – ЛНП – вода». Глубина уровней: $H_{ao}^w = H_{ao}$ – «ЛНП – воздух» в скважине и в грунте; H_{ow}^w – «ЛНП – вода» в грунте; H_{ao}^c, H_{aw}^c – предварительно рассчитанные глубины границ «воздух – ЛНП» ненасыщенной капиллярной зоны и «ЛНП – вода» насыщенной капиллярной зоны; H_{ao}^c, H_{ow}^c – скорректированные глубины границ вышеуказанных капиллярных зон; θ_w, θ_o – содержание воды и ЛНП в грунте; θ_s – полное объемное содержание флюидов в грунте; $\theta_{o,p}$ – заданное экспе-

риментально определенное содержание остаточного ЛНП в грунте; T_o – мощность слоя с мобильным ЛНП; h_{ao}^c, h_{ow}^c – мощность ненасыщенной и насыщенной капиллярных зон.

Индексация θ_o : r – остаточный; c – капиллярный в ненасыщенной среде; m – мобильный; cs – капиллярный в насыщенной среде; e – заземленный.

*1 Корректировка H_{ao}^c – определяется глубина, при которой $h_{ao} = h_{ow}$.

*2 Корректировка H_{ow}^c – по расчетам блока 7 устанавливается глубина с минимальным содержанием θ_o (20–30% от $\theta_{ot,ow}^m$)

Fig. 2. The scheme of calculation analysis for Block 7 for the period of the formation of mobile LPP layer

Fluid systems: aw – «air – water»; ow – «LPP – water»; aow – «air – LPP – water». A level depth: $H_{ao}^w = H_{ao}$ – «LPP – air» in a well and in soil; H_{ow}^w – «LPP – water» in soil; H_{ao}^c, H_{aw}^c – preliminary calculated depths of interfaces «air – LPP» of the unsaturated capillary zone and «LPP – water» of the saturated capillary zone; H_{ao}^c, H_{ow}^c – corrected depths of interfaces of the indicated capillary zones; θ_w, θ_o – water and LPP contents in soil; θ_s – total volume fluid content in soil; $\theta_{o,p}$ – specified experimentally determined residual LPP content in soil; T_o – mobile LPP layer thickness; h_{ao}^c, h_{ow}^c – thicknesses of unsaturated and saturated capillary zones.

Indexation θ_o : r – residual; c – capillary in the unsaturated zone; m – mobile; cs – capillary in the saturated zone; e – trapped.

*1 Correction of H_{ao}^c – determination of a depth, at which $h_{ao} = h_{ow}$.

*2 Correction of H_{ow}^c – by the calculations of Block 7, determination of a depth with a minimum content of θ_o (20–30% of $\theta_{ot,ow}^m$)

H_{ao}^c приурочивается к первой от поверхности глубине z , где присутствует рассчитанное θ_o и где $h_{aw} = h_{ao}$; H_{ow}^c – к глубине z , где рассчитанное $\theta_o \leq \theta_{ot,ow}^m$ ($\theta_o = 20-30\%$ от $\theta_{ot,ow}^m$). Ниже H_{ow}^c среда насыщена водой: $\theta_o = 0$, $\theta_w = \theta_s$.

Если выше глубины H_{ao}^c , где рассчитывается «а – w» система и определяется θ_w^c (расчетное), с помощью лабораторных анализов установлено содержание ЛНП (θ_{op}), то $\theta_o = \theta_{op}$ и принимается как остаточное (r), а содержание воды устанавливается как $\theta_w = \theta_w^c - \theta_{op}$. Значения θ_w и θ_o вводятся в массив значений θ_w и θ_o Блока 9.

② *Первый подъем УГВ:* $H_{ao,t-1}^w > H_{ao,t}^w$ (t – время).

Мощность слоя (T_o) с мобильным (m) ЛНП уменьшается, слой занимает более высокое положение, чем при формировании. Устанавливается новое H_{ao}^c аналогично пункту ①. H_{ow}^c устанавливается на глубине, где по расчету $\theta_o^{ow} = \theta_{ot,ow}^m$. В зонах «а – w», «а – о – w», «о – w» значения θ_w и θ_o принимаются согласно рис. 2.

Если на глубине z среда насыщена водой (s) и на предыдущем времени ($t-1$) в этом z был капиллярный ЛНП (cs) с $\theta_o \geq \theta_{ot}^m$, то на расчетном времени (t) принимается $\theta_o = \theta_{ot,ow}^m$. Если $\theta_{o,t-1} < \theta_{ot,ow}^m$, то $\theta_o = \theta_{o,t-1}$. θ_o считается защемленным (e), а содержание воды на глубине z будет:

$$\theta_w = \theta_s - \theta_o.$$

Если на предыдущем времени ($t-1$) в насыщенной водой среде (s) $\theta_o = 0$, то и на времени t $\theta_o = 0$ и $\theta_w = \theta_s$.

При $T_o^w \leq \frac{h_d^{ao}}{1 - \rho_{r,o}}$ $T_o = 0$ – мобильный

ЛНП (m) отсутствует, но капиллярная зона h_{ao}^c формируется при $H_{ao,p}^c < H_{ao}^w$, а капиллярная зона h_{ow}^c – при $H_{ow,p}^c > H_{ao}^w$. Граница H_{ao}^c устанавливается аналогично пункту ①, граница H_{ow}^c – в z , где $\theta_o^{ow} \approx \theta_{ot,ow}^m$. Зоны «а – w», «а – о – w», «о – w» и «s» анализируются аналогично описанному в пункте ②.

При дальнейшем подъеме УГВ рассчитанное на предыдущее время содержание капиллярного ЛНП в ненасыщенной зоне (h_{ao}^c) между $H_{ao,t-1}^w$ и $H_{ao,t-1}^c$ и в насыщенной зоне (h_{ow}^c) между $H_{ow,t-1}^w$ и $H_{ow,t-1}^c$ становится защемленным (e) водой в системе «а – w», рассчитываемой по $\theta_w^c(h_{aw})$ в Блоке 7, и $\theta_o = \theta_{o,t-1}$.

Если $h_{aw} > 0$, то $\theta_w = \theta_{w,aw}^c - \theta_o$; если $h_{aw} \leq 0$, то $\theta_w = \theta_s - \theta_o$; если $\theta_o = 0$, то $\theta_w = \theta_s$.

③ *Опускание УГВ после подъема:* $H_{ao,t-1}^w < H_{ao,t}^w$.

При опускании УГВ следом происходит стекание как воды, так и ранее защемленного ЛНП. При первоначальном более интенсивном стекании воды (см. статью [Парамонова и др., 2016]) образуется система «а – о – w», рассчитываемая в Блоке 7, пункт д), с определением кажущегося $\theta_w^a(h_{aw})$ и $\theta_w^{ow}(h_{ow})$. Тогда расчетное $\theta_o^p = \theta_{w,aw}^a - \theta_w^{ow}$, а $\theta_w = \theta_w^{ow}$.

Если $\theta_o^p < \theta_{or}^{aow}$, то $\theta_o < \theta_{or}^{aow}$. Если $\theta_{o,t-1} < \theta_{or}^{aow}$, то $\theta_o = \theta_{o,t-1}$, а $\theta_w = \theta_{w,aw}^a - \theta_o$.

Ниже находится насыщенная водой (s) система с защемленным на времени ($t-1$) θ_o , который остается защемленным и на время t . Тогда $\theta_o = \theta_{o,t-1}$, а $\theta_w = \theta_s - \theta_o$. Если $\theta_{o,t-1} = 0$, то $\theta_w = \theta_s$. При дальнейшем

опускании УГВ ниже системы «а – w» происходит формирование капиллярных зон: h_{ao}^c , если $H_{ao,p}^c < H_{ao}^w$, которая рассчитывается в Блоке 7 по системе «а – о – w», и h_{ow}^c , если $H_{ow}^c > H_{ao}^w$, которая рассчитывается по системе «о – w». H_{ao}^c корректируется согласно пункту ①, H_{ow}^c устанавливается на глубине, где $\theta_o^{ow} \approx \theta_{ot,ow}^m$. Расположенная ниже насыщенная водой зона (s) анализируется аналогично предыдущему пункту.

При дальнейшем опускании УГВ появляется слой мобильного ЛНП, если $T_o^w \geq h_d^{ao} / (1 - \rho_{r,o})$. Принимается его мощность T_o и положение $(H_{ao}^w - H_{ow})$ согласно Блоку 3, уточняются границы капиллярных зон: $h_{ao}^c - (H_{ao}^w - H_{ao}^c)$ – согласно пункту ①, и $h_{ow}^c - (H_{ow}^c - H_{ow})$ – где по расчету $\theta_o \geq \theta_{ot,ow}^m$. Если на предыдущем времени $\theta_{o,t-1} = 0$, то аналогично пункту ① H_{ow}^c устанавливается там, где $\theta_o \approx 20-30\%$ от $\theta_{ot,ow}^m$.

Расположенная выше зона «а – w» и расположенная ниже насыщенная водой зона анализируются аналогично описанному выше.

④ *Повторный подъем уровня:*
 $H_{ao,t-1}^w > H_{ao,t}^w$.

При повторном подъеме УГВ слой с мобильным ЛНП уменьшается до полного исчезновения при $T_o^w < h_d^{ao} / (1 - \rho_{z,o})$ с сокращением капиллярных зон и их исчезновением при $H_{ao,p}^c > H_{ao}^w$ и $H_{ow,p}^c < H_{ao}^w$.

При наличии слоя с мобильным ЛНП и капиллярных зон границы H_{ao}^c и H_{ow}^c уточняются согласно пункту ②. В зонах, расположенных выше H_{ow}^c (с системами «а – w», «а – о – w», «о – w»), значения θ_w и θ_o вписываются в таблицу Блока 9 по данным расчета Блока 7 и описанного выше анализа.

В насыщенной водой зоне (s), если $\theta_{o,t-1} > \theta_{ot,ow}^m$, то $\theta_o = \theta_{ot,ow}^m$; если $\theta_{o,t-1} < \theta_{ot,ow}^m$, то $\theta_o = \theta_{o,t-1}$ и является защемленным (e). $\theta_w = \theta_s - \theta_o$. При $\theta_{o,t-1} = 0$, $\theta_w = \theta_s$.

При дальнейшем подъеме УГВ зона ниже УГВ становится насыщенной водой с защемленным в ней ЛНП, который на период времени $(t - 1)$ был в состоянии r, c, cs, e. $\theta_w = \theta_s - \theta_{o_s,c,cs,e}$.

При расчете зоны «а – w» (выше H_{ao}^c или H), если на предыдущем времени $(t - 1)$ находился ЛНП в остаточном состоянии (r), то расчетом в Блоке 7 получают расчетное значение $\theta_{w,aw}^c$. В таблицу Блока 9 вписываются значения $\theta_w = \theta_{w,aw}^c - \theta_{or}$.

Дальнейшие опускания и подъемы УГВ анализируются аналогично описанному выше.

⑤ *Первое опускание УГВ:*
 $(H_{ao,t-1}^w < H_{ao,t}^w)$ *после формирования слоя с мобильным ЛНП.*

Происходит одновременное опускание уровней (H_{ao}^w и $< H_{ow}^w$) и более медленное уменьшение мощности мобильного слоя ЛНП за счет перехода небольшой части свободного ЛНП в остаточный выше вновь сформированной капиллярной зоны (h_{ao}^c). Насыщенная система «о – w» переходит в систему «а – о – w», в которой выше H_{ao}^c происходит медленное стекание как воды, так и ЛНП. Величина остаточного ЛНП уменьшается со временем стекания до установившихся за время T θ_{or}^{aow} и θ_{wr}^{aow} , что определяется лабораторно (см. статью [Парамонова и др., 2016]) и задается (Блок 1).

Если время стекания T меньше времени процесса опускания УГВ (Δt), то $\theta_w = \theta_{wr}^{aow}$ и $\theta_o = \theta_{or}^{aow}$.

Если при этом $\theta_{o,t-1} < \theta_{or}^{aow}$ и $\theta_{w,t-1} < \theta_{wr}^{aow}$, то $\theta_o = \theta_{o,t-1}$, а $\theta_w = \theta_{w,t-1}$. Если $\theta_{o,t-1} > \theta_{or}^{aow}$ и $\theta_{w,t-1} > \theta_{wr}^{aow}$, то $\theta_o = \theta_{or}^{aow}$ и $\theta_w = \theta_{wr}^{aow}$.

Если $T > \Delta t$, то определяются текущие значения остаточного содержания $\theta_{wr,t}^{aow}$ и $\theta_{or,t}^{aow}$ для глубины z_i из таблицы или графика экспериментальных их замеров в

процессе стекания. Для этого необходимо установить время стекания до глубины z_i (Δt_{z_i}), исходя из того, что время стекания в точке z_i , соответствующей верхнему положению уровня H_{ao}^w , составит Δt . Тогда

$$\Delta t_{z_i} = \Delta t - \frac{\Delta t \times \Delta z_{1-i}}{\Delta z_{1-n}} = \Delta t \left(1 - \frac{\Delta z_{1-i}}{\Delta z_{1-n}} \right),$$

где Δz_{1-i} — расстояние от точки z_i до точки z_1 ; Δz_{1-n} — понижение УГВ за время Δt от точки z_1 до точки z_n , соответствующей нижнему положению уровня H_{ao}^w .

По значению Δt_{z_i} определяются по таблице или графику (в Блоке 1) экспериментальные данные величины текущих остаточных значений $\theta_{or,t}^{aow}$ и $\theta_{wr,t}^{aow}$ для глубин z_i . Дальнейший анализ проводится аналогично вышеописанному для $T < \Delta t$, принимая вместо $\theta_{or,t}^{aow}$ и $\theta_{wr,t}^{aow}$ значения $\theta_{or,t}^{aow}$ и $\theta_{wr,t}^{aow}$.

В зоне «a-w», где на время $(t-1)$ отсутствовал ЛНП, в сформировавшихся зонах h_{ao}^c , T_o , h_{ow}^c , s расчеты и анализ выполнены согласно пункту ①.

Распределение и состояние ЛНП и воды при повторных подъемах и опусканиях УГВ рассчитываются и анализируются аналогично описанному выше.

Блок 9. Формирование массива значений θ_w и θ_o после их расчета и анализа (Блоки 7, 8)

Полученные значения θ_w и θ_o и их состояние после расчета и анализа в Блоках 7, 8 заносятся в таблицу для каждой выделенной для расчета глубины (z_i) по всем рассматриваемым датам.

Состояние ЛНП (θ_o) классифицируется следующим образом:

- капиллярное ненасыщенное (с) – между H_{ao}^w и H_{ao}^c ;
- мобильное (m) – между H_{ao}^w и H_{ow} ;

- капиллярное насыщенное (cs) – между H_{ow} и H_{ow}^c ; при $T_o = 0$ – между H_{ao}^w и H_{ow}^c .
- заземленное (e) – после подъема УГВ, бывшее на предыдущем времени остаточным, лабораторно определенным или капиллярным (r, c, cs);
- остаточное (r) – после опускания УГВ, если на предыдущем времени ЛНП находился в состоянии (r, c, cs, m, e).

Блок 10. Обработка выходных данных

Результаты расчетов и анализа на каждую или указанную дату вносятся в таблицу, имеющую шаблон (рис. 3), для расчета объема воды и ЛНП и его распределения в разрезе и в зависимости от того, в каком состоянии находится ЛНП.

В каждом столбце шаблона приводится: ст. 1 – все глубины z , по которым производится расчет;

ст. 2 – в соответствующих z отмечаются глубины уровней в скважине и породе: H_{ao}^c , H_{ao}^w , H_{ow} , H_{ow}^c , H_{end} – глубина вскрытия водоносного горизонта; берутся из Блока 3;

ст. 3 – рассчитывается величина промежутков между расчетными глубинами:

$$\Delta z = z_n - z_{n-1};$$

ст. 4 – объем грунта между расчетными глубинами в единичном или интересующем сечении:

$$V_{s,\Delta z} = \Delta z F,$$

где F – площадь сечения;

ст. 5 – капиллярный напор «воздух – вода» (h_{aw}) в расчетном сечении (Блок 6);

ст. 6 – капиллярный напор «воздух – ЛНП» (h_{ao}) в расчетном сечении (Блок 6);

ст. 7 – капиллярный напор «ЛНП – вода» (h_{ow}) в расчетном сечении (Блок 6);

ст. 8 – принятое содержание воды (θ_w) на глубине z (из Блока 9);

ст. 9 – осредненное содержание воды ($\theta_{w,md}$) в промежутке глубин z_n и z_{n-1} :

$$\theta_{w,md} = \frac{\theta_{wz_n} + \theta_{wz_{n-1}}}{2};$$

Глубь, z, м, см	Уров- ни	Δz , м, см	$V_{s(\Delta z)}$, м ³ , см ³	$h_{ав}$, м, см	h_{ao} , м, см	h_{ow} , м, см	θ_w , д. ед.	$\theta_{w,md}$, д. ед.	$V_{w(\Delta z)}$, м ³ , см ³	θ_o , д. ед.	$\theta_{o,md}$, д. ед.	$V_{o(\Delta z)}$, м ³ , см ³	Состо- яние	$V_{o,ин}$, м ³ , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	H_{ao}^c													
	H_{ao}^w													
	H_{ow}													
	H_{ow}^c													
	H_{end}													
Σ												Σ		

Рис. 3. Шаблон таблицы обработки выходных данных

Fig. 3. The pattern of the table of output data treatment

ст. 10 – объем воды (V_w), содержащейся в интервале Δz :

$$V_{w,\Delta z} = \theta_{w,md} V_{s,\Delta z};$$

в конце столбца суммируются все $V_{w,\Delta z}$, определяя общее содержание воды в разрезе;

ст. 11 – принятое содержание ЛНП (θ_o) на глубине z (из Блока 9);

ст. 12 – осредненное содержание ЛНП ($\theta_{o,md}$) в промежутке глубин Z_n и Z_{n-1} :

$$\theta_{o,md} = \frac{\theta_{ozn} + \theta_{ozn-1}}{2};$$

ст. 13 – объем ЛНП, содержащийся в интервале Δz :

$$(V_{o,\Delta z} = \theta_{o,md} V_{s,\Delta z});$$

в конце столбца суммируются все $V_{o,\Delta z}$, определяя общее содержание ЛНП в разрезе;

ст. 14 – обозначения состояния ЛНП, находящегося в грунте: «с» – в капиллярном состоянии выше уровня мобильного ЛНП (H_{ao}^w) в системе «а – о – w» в интервале ($H_{ao}^w - H_{ao}^c$); «m» – в мобильном состоянии в интервале уровней ($H_{ao}^w - H_{ow}$); «cs» – в капил-

лярном состоянии ниже уровня H_{ow} в интервале ($H_{ow}^c - H_{ow}$); «r» – остаточный ЛНП после процесса дренирования в трехфлюидной системе; «e» – заземленный ЛНП после подъема УВ;

ст. 15 – объем ЛНП в выделенных интервалах состояния ЛНП.

Блок 11. Вывод выбранных промежуточных таблиц и результатов (таблицы Блока 10) на выбранные даты в файл

Выбираются пользователем.

Выводы

Приведенный в статье порядок расчета и анализа флюидных систем в загрязненной ЛНП геологической среде в процессе колебания УГВ проверен физическим моделированием создания слоя с мобильным авиационным керосином на уровне воды в колонне с песком и его трансформации в процессе подъема и опускания уровня воды. Объемы находящиеся в колонне воды и ЛНП определены объемным измерением и расчетами по данному алгоритму. Результаты и сопоставление лабораторных исследований и расчетов будут изложены в последующих статьях.

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 funda-

mentals of studying of subsurface contamination with light petroleum products. Kiev: A. P. N., 278 p. (in Russian).

2. Огняник 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 / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова // 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).*

3. Огняник 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 / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова // 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).*

4. Огняник Н.С. 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 пори-

стой среде / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова // Геол. журн. – 2016в. – № 4 (357). – С. 87-102.

*Ognianik N.S., Paramonova N.K., 2016v. 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. Влияние колебания уровня грунтовых вод на формирование остаточных и заземленных легких нефтепродуктов / Н.К. Парамонова, Г.И. Голуб, И.Н. Запольский, О.И. Логвиненко, Ю.А. Негода // 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).*

6. Парамонова Н.К. Расчет распределения мобильных и удерживаемых легких нефтепродуктов в линзе, сформировавшейся на грунтовых водах / Н.К. Парамонова // Геол. журн. – 2003. – № 3 (304). – С. 69–76.

*Paramonova N.K., 2003. Estimation of mobile and retained light hydrocarbon distribution in a lens on groundwater table. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (304), p. 69–76 (in Russian).*

Статья поступила
30.03.2016