



**Физико-математическое
моделирование
нестационарного
процесса работы
системы «Пласт-
Скважина-УЭЦН»**

Авторы: к.т.н., доцент каф. «РиЭНиГМ»,
с.н.с. ООО «СамараНИПИнефть»
Грибенников Олег Алексеевич;
аспирант каф. «РиЭНиГМ»
Мельников Арсений Алексеевич

Научно- практическая конференция «Цифровые
технологии в добыче и переработке
углеводородов: от моделей к практике»
г.Уфа, 6-9 октября 2020 года

Цель и задачи исследования

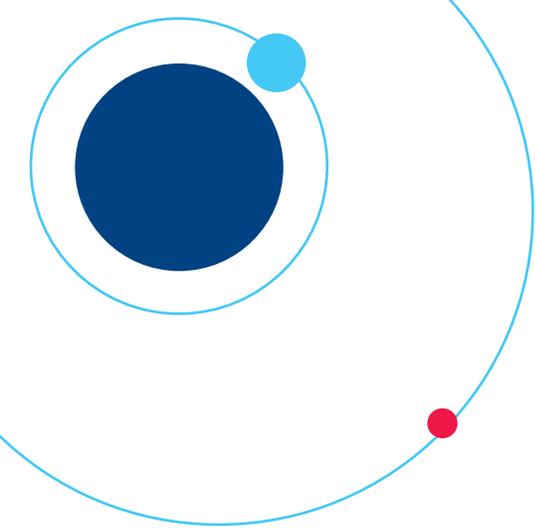


Цель исследования:

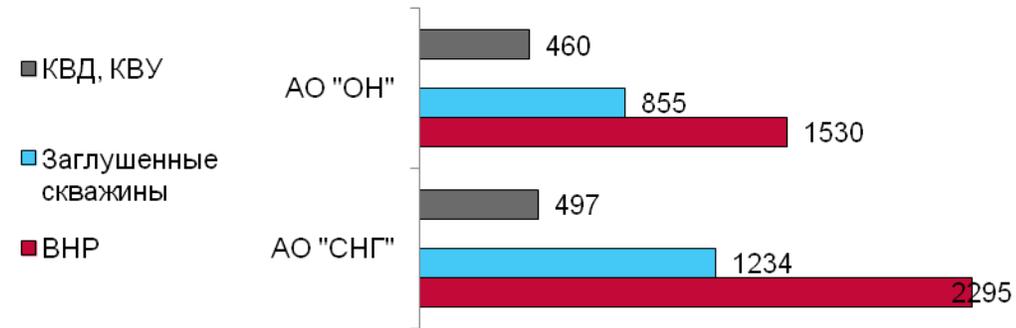
Исследование нестационарных процессов при выводе скважины на стационарный режим работы с использованием физико-математического моделирования для повышения информативности об эксплуатационных объектах с целью обеспечения рациональной разработки нефтяных месторождений.

Задачи:

1. Провести анализ физических процессов в системе «Пласт-Скважина-Насос» при выводе скважины на стационарный режим работы.
2. Разработка физико-математической модели процесса вывода скважины на режим в случае эксплуатации однородного коллектора.
3. Разработка физико-математической модели процесса вывода скважины на режим в случае эксплуатации неоднородного коллектора.
4. Разработка методики прогнозирования процесса вывода скважины на стационарный режим работы.
5. Разработка методики определения пластового давления по данным вывода скважины на режим.
6. Разработка методики определения коллекторских свойств эксплуатационного объекта по данным вывода скважины на режим.



Актуальность исследования



1) Вывод скважины на стационарный режим работы является часто проводимой операцией в добывающих организациях;

2) Физико-математическая модель позволит

- оптимизировать проведение технологической операции по выводу скважины на режим (решение прямой задачи);
- определять фильтрационно-емкостные параметры продуктивного пласта

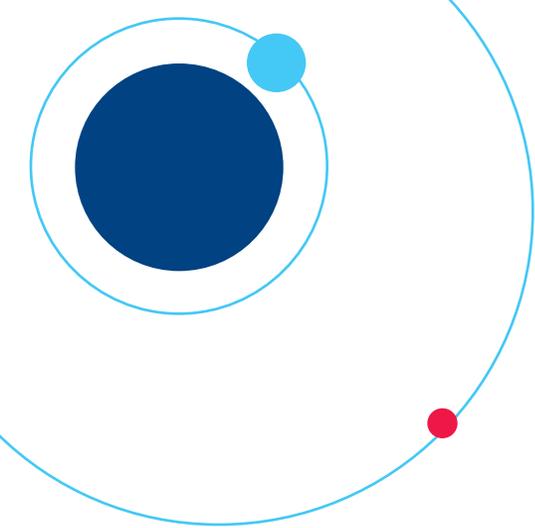
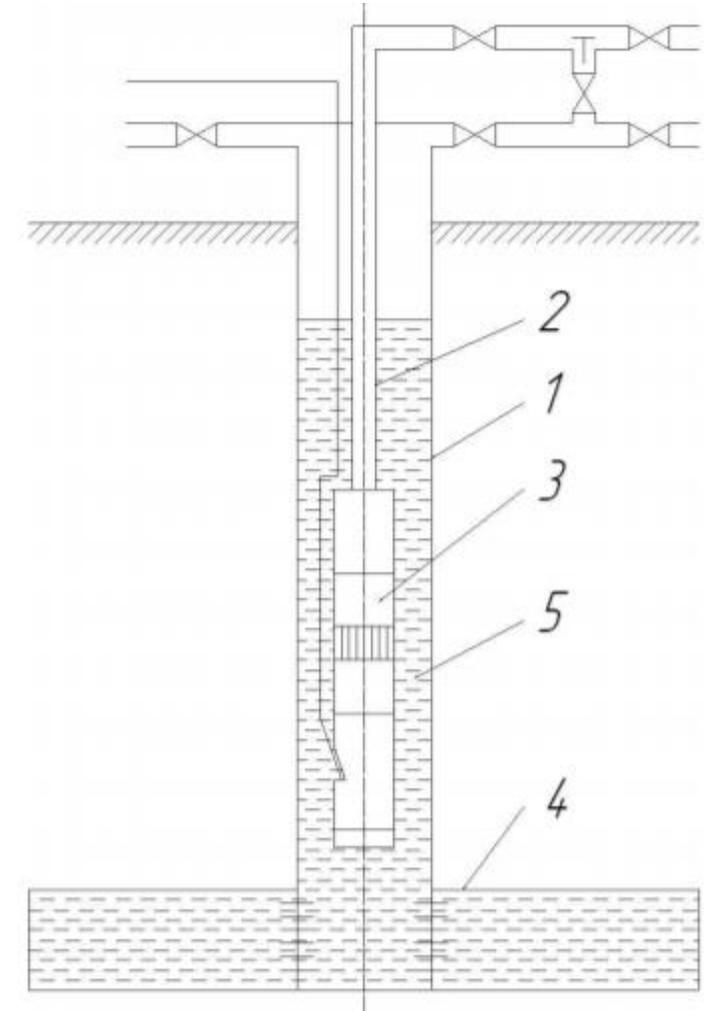
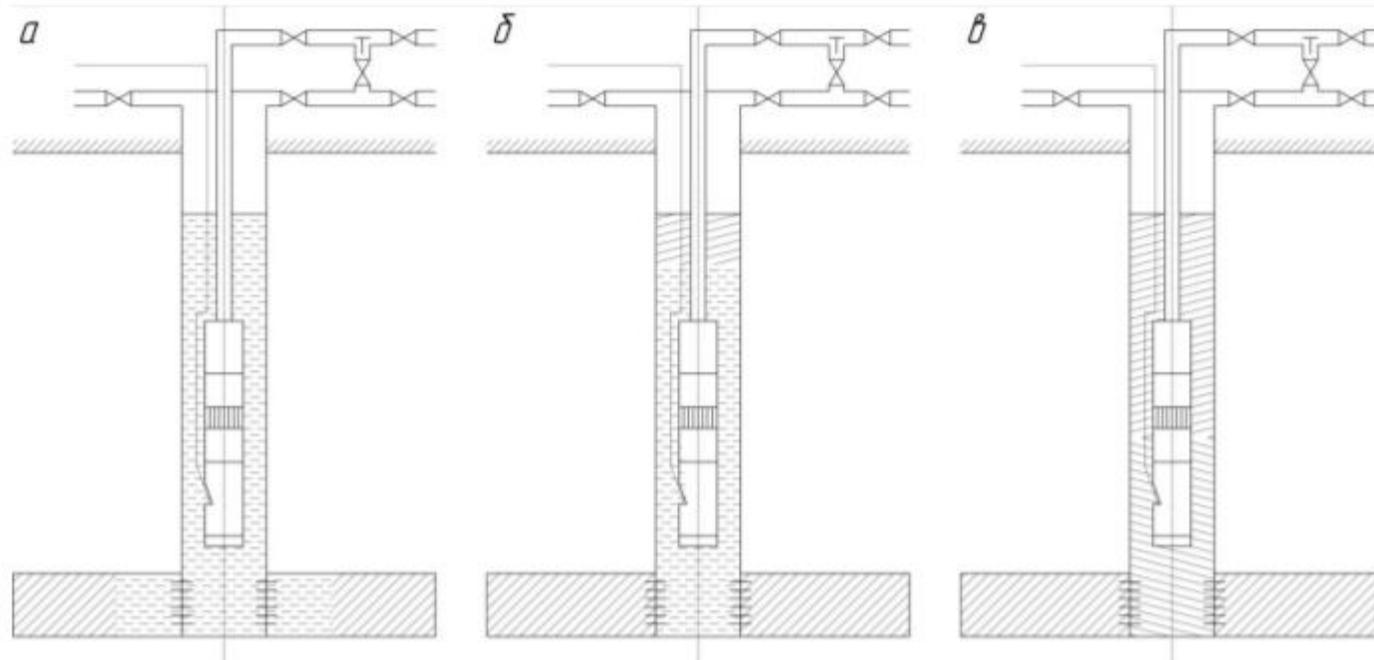
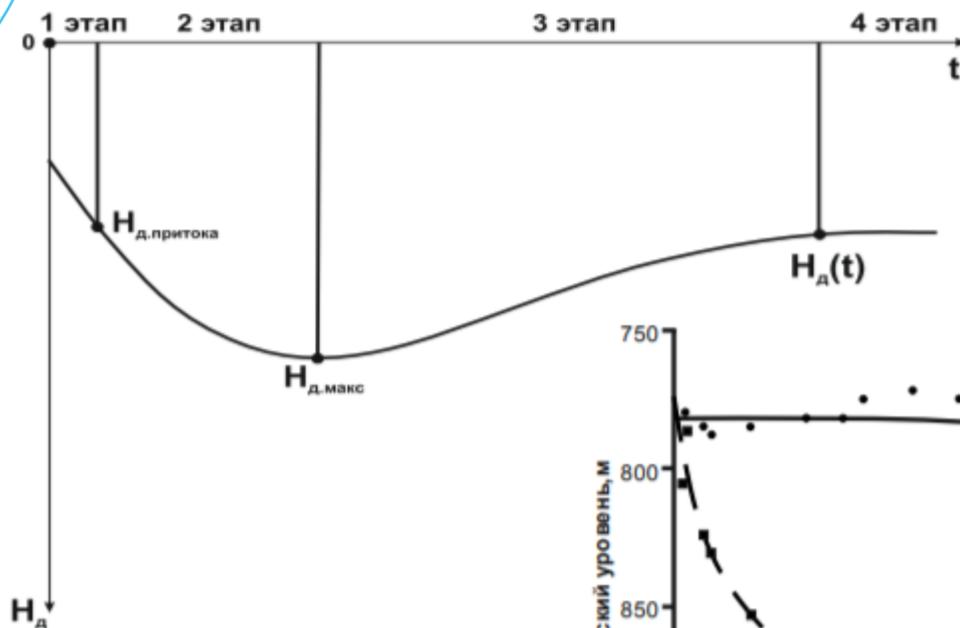


Схема и состояние системы «Пласт-Скважина-Насос»



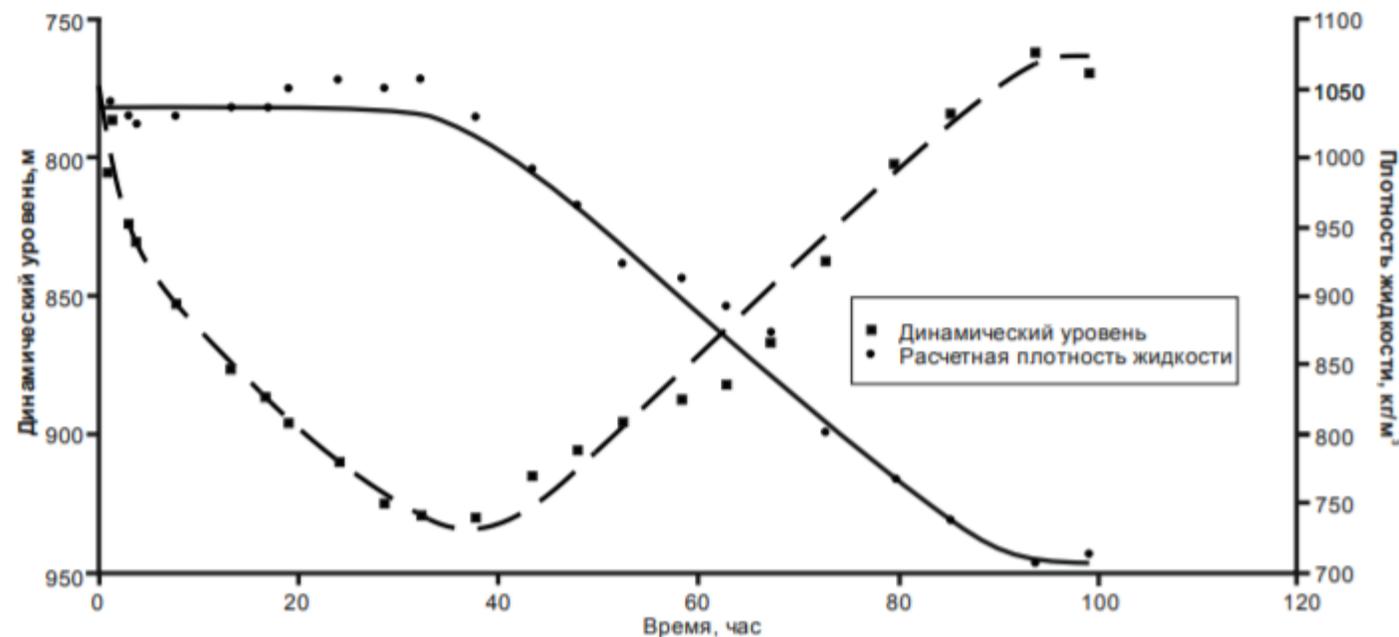
Вывод скважины на стационарный режим работы



Отбор скважин кандидатов:

- 1) Насосы спущены практически до забоя.
- 2) Установки оснащены термоманометрической системой.

- $$\left\{ \begin{array}{l} \text{1 этап: } V_{\text{затр}} > 0; V_{\text{пл}} = 0; \rho_{\text{ж}} = \text{const}; \\ \text{2 этап: } V_{\text{затр}} > 0; V_{\text{пл}} > 0; \rho_{\text{ж}} = \text{const}; \\ \text{3 этап: } V_{\text{затр}} > 0; V_{\text{пл}} > 0; \rho_{\text{ж}} \rightarrow \bar{\rho}_{\text{н}}; \\ \text{4 этап: } V_{\text{затр}} = 0; V_{\text{пл}} > 0; \rho_{\text{ж}} = \bar{\rho}_{\text{н}}; \end{array} \right.$$



Работа системы «Пласт-Скважина-Насос»

I этап вывода:

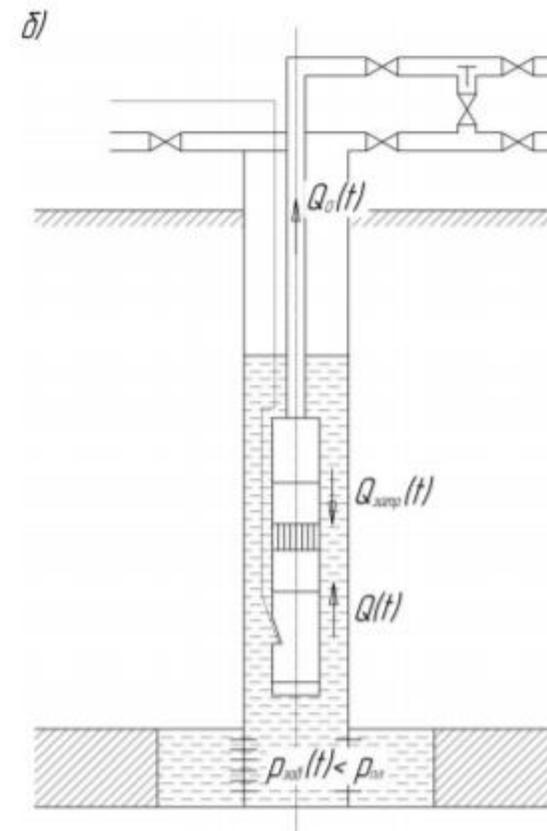
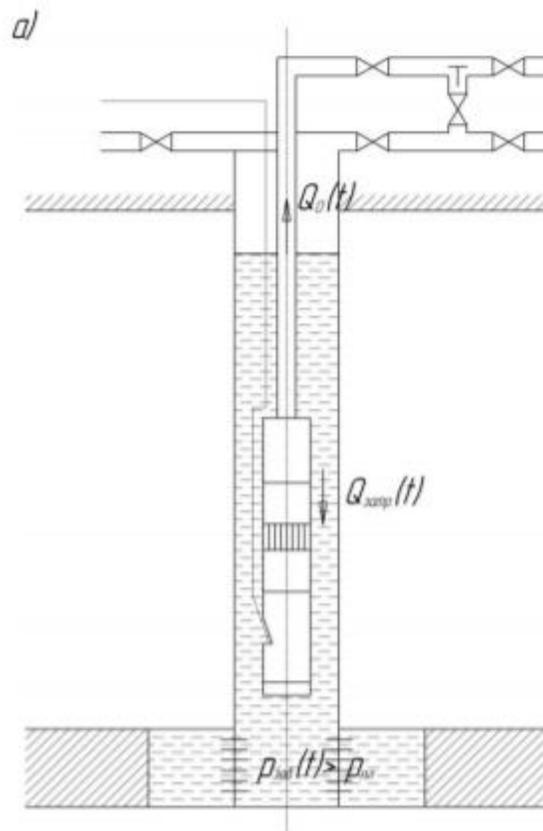
$$Q_0 = Q_{\text{затр}}(t) + Q(t).$$

II этап вывода:

$$Q_0(t) = Q_{\text{затр}}(t) + Q(t).$$

Допущение:

Откачка жидкости насосом не изменяется в процессе вывода скважины на режим, т.е. $Q_0 = \text{const}$.



Моделирование первого этапа вывода скважины на режим

$$Q_0 = Q_{\text{затр}}(t) + Q(t).$$

$$Q_{\text{затр}}(t) = Q_0.$$

$$Q_0 = -\frac{dV}{dt} = -F \frac{dh}{dt}.$$

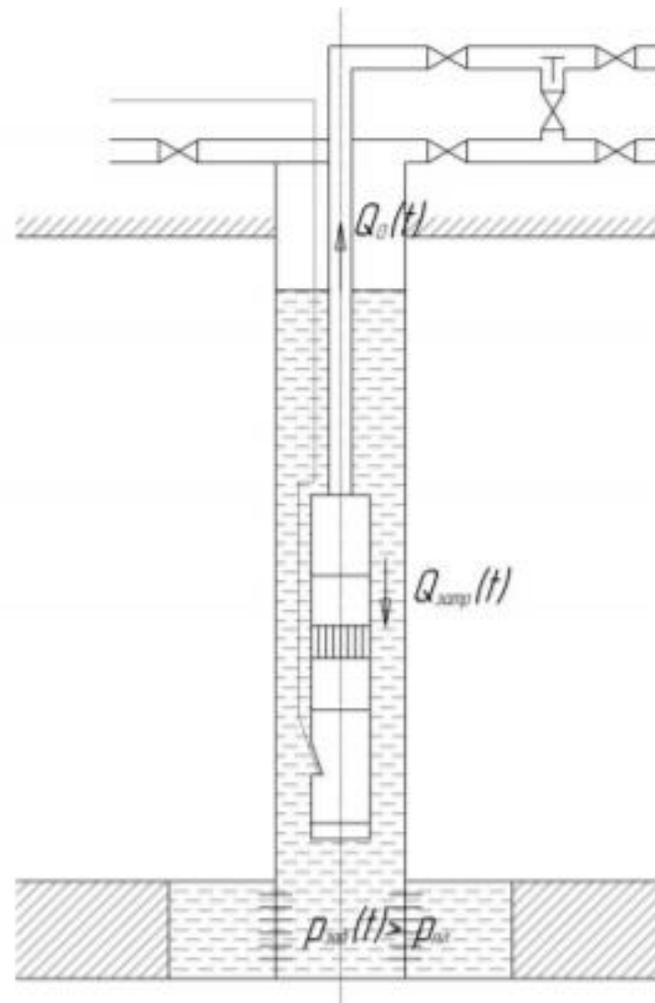
$$-Fdh = Q_0 dt.$$

$$-\int_{h_0}^{h(t)} Fdh = \int_0^t Q_0 dt.$$

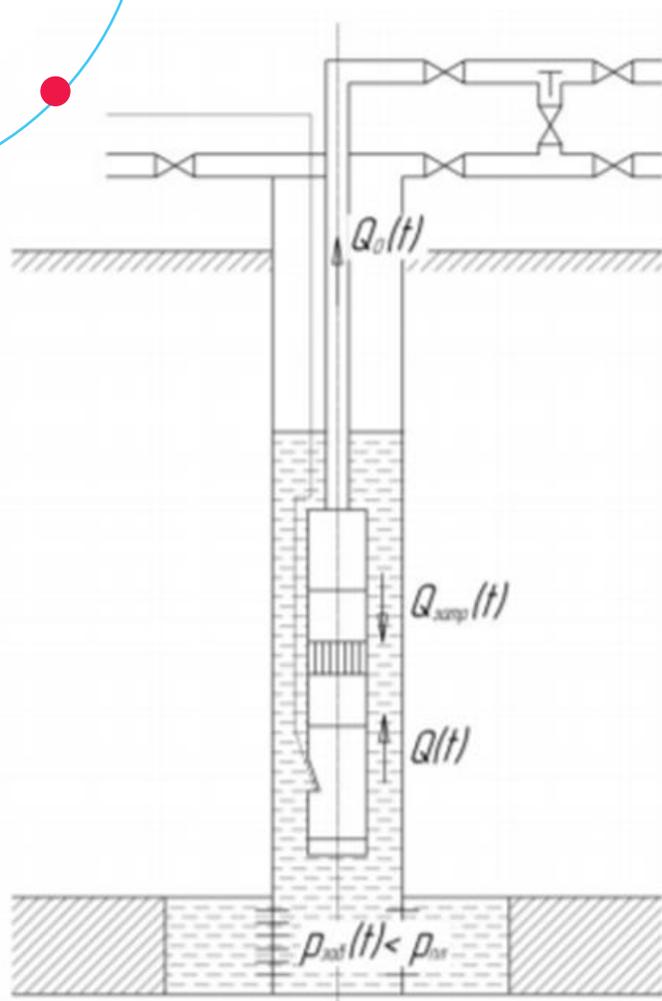
$$-F[h(t) - h_0] = Q_0 t.$$

$$h(t) = h_0 - \frac{Q_0 t}{F}.$$

$$p_{\text{заб}}(t) = \gamma h_0 - \frac{\gamma Q_0}{F} t.$$



Характер притока жидкости в пласте



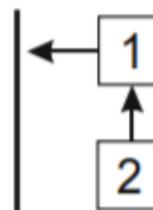
1. Однородное (гомогенное) поведение

Одна подвижность kh/μ
Одна упругоёмкость $\phi_c c_t h$

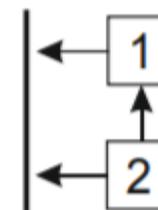


2. Неоднородное (гетерогенное) поведение

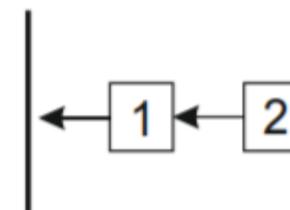
Более одной подвижности и упругоёмкости



Двойная пористость
Слоисто - неоднородный пласт
Пласт после ГРП



Двойная проницаемость
Слоисто - неоднородный пласт



Композит
Геологическая неоднородности
Многофазный флюид

Моделирование второго этапа вывода скважины на режим при однородном коллекторе

$$Q_0(t) = Q_{затр}(t) + Q(t).$$

$$Q_{затр}(t) = -\frac{dV}{dt} = -F \frac{dh}{dt}.$$

$$Q(t) = 2\pi r_{скв} h_{пл} \vartheta(r_{скв}, t).$$

$$\vartheta(r, t) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p(r, t)}{\partial r}.$$

$$\chi \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial t}.$$

$$p(r, 0) = p_{пл},$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} p(r, \tau) = p_{пл},$$

$$p(r_{скв}, \tau) = p_{заб}(\tau) + S r_{скв} \frac{\partial p(r_{скв}, \tau)}{\partial r}.$$

С
К
В
А
Ж
И
Н
А

← Приток

Пласт

$$C \left(\frac{p_{пл}}{s} - \bar{p}_{заб}(s) \right) = \bar{Q}_0(s) \left(\frac{1}{s} - \frac{\alpha}{s^2} + \frac{\beta}{s^{5/2}} - \frac{\gamma'}{s^3} + \dots \right),$$

$$C [p_{пл} - p_{заб}(\tau)] = C \Delta p(\tau) = Q_0 \left(\tau - \frac{\alpha \tau^2}{2} + \frac{8}{15} \frac{\beta \tau^{5/2}}{\sqrt{\pi}} - \frac{\gamma' \tau^3}{6} + \dots \right).$$

Моделирование второго этапа вывода скважины на режим при неоднородном коллекторе с эффектом двойной проницаемости

$$Q_0(t) = Q_{\text{затр}}(t) + Q_1(t) + Q_2(t)$$

$$Q_{\text{затр}}(t) = \frac{F d\Delta P_{\text{заб}}}{\gamma dt}$$

$$Q_{1,2} = \frac{2\pi r_{\text{СКВ}} k_{1,2} h_{1,2}}{\mu} \frac{\partial \Delta P_{1,2}}{\partial r}$$

$$\begin{cases} \frac{k_1 h_1}{\mu} \nabla^2 \Delta P_1 = (\phi c_t h)_1 - \alpha \frac{k_2}{\mu} (\Delta P_2 - \Delta P_1) \\ \frac{k_2 h_2}{\mu} \nabla^2 \Delta P_2 = (\phi c_t h)_2 + \alpha \frac{k_2}{\mu} (\Delta P_2 - \Delta P_1) \end{cases}$$

$$\Delta q = \alpha \frac{k_2}{\mu} (P_2 - P_1) \quad h_{\text{пл}} = h_2 + h_1$$

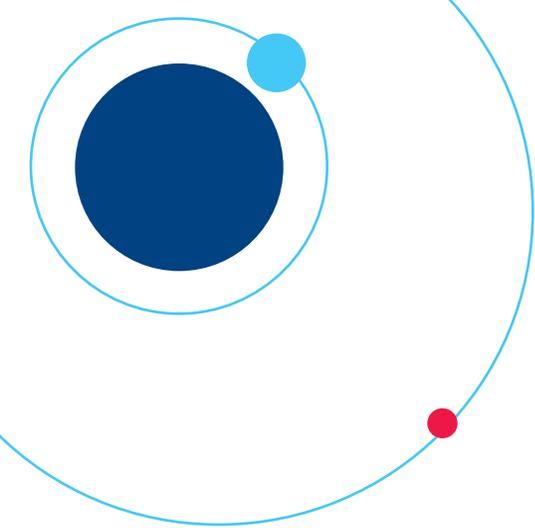
$$\begin{cases} \lim_{r \rightarrow \infty} \Delta P_1(r, t) = 0 & \begin{cases} \Delta P_1(r_{\text{СКВ}}, t) = \Delta P_{\text{заб}} \\ \Delta P_2(r_{\text{СКВ}}, t) = \Delta P_{\text{заб}} \end{cases} \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \Delta P_2(r, t) = 0 \end{cases}$$

С
к
в
а
ж
и
н
а



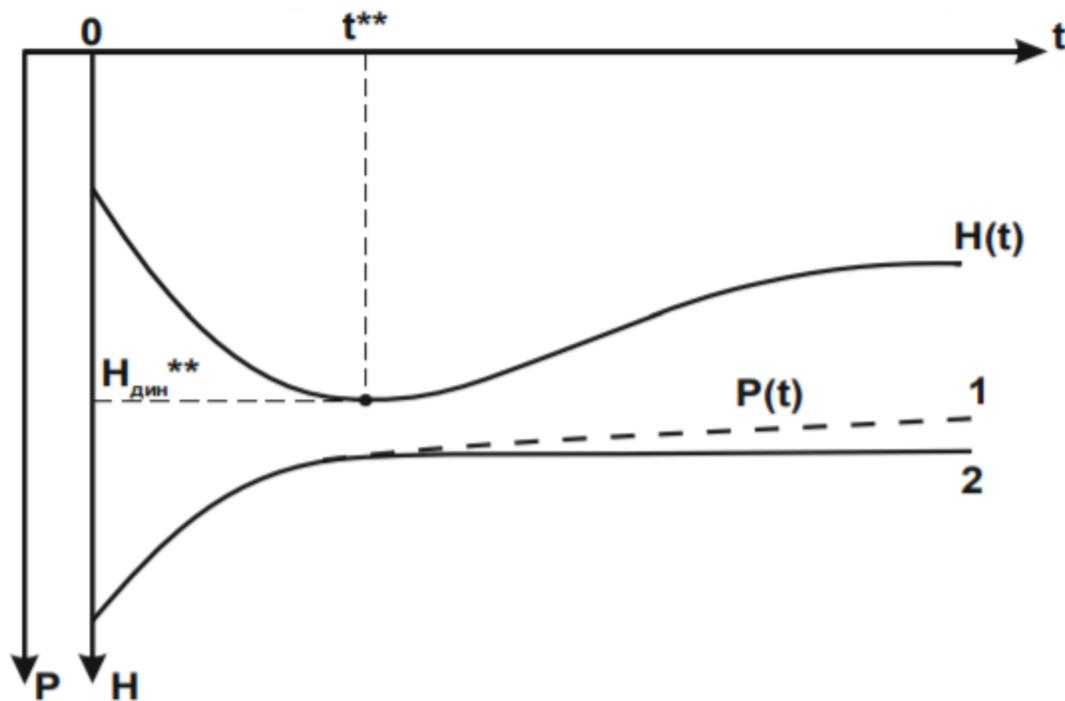
Решение:

$$\Delta \bar{P}_{\text{заб}} = Q_0 \frac{\gamma}{F} \left(\frac{G_0}{s} + \frac{G_1}{s^2} + \frac{G_2}{s^3} + \frac{G_3}{s^4} + \frac{G_4}{s^5} + \frac{G_5}{s^6} + \dots \right) \quad \Rightarrow \quad P_{\text{заб}} = P_{\text{пл}} - Q_0 \frac{\gamma}{F} \left(G_0 t + G_1 \frac{t^2}{2} + G_2 \frac{t^3}{6} + G_3 \frac{t^4}{24} + G_4 \frac{t^5}{120} + G_5 \frac{t^6}{720} + \dots \right)$$



Решение прямой задачи на примере модели с однородным коллектором

$$\begin{cases} p_{\text{заб}}(t) = \gamma h_0 - \frac{\gamma Q_0}{F} t, & \text{при } 0 < t < t^* \\ p_{\text{заб}}(t) = p_{\text{пл}} - \frac{Q_0}{C} \left((t - t^*) - \frac{\alpha(t - t^*)^2}{2} + \frac{8}{15} \frac{\beta(t - t^*)^{5/2}}{\sqrt{\pi}} - \frac{\gamma'(t - t^*)^3}{6} + \dots \right), & \text{при } t > t^* \end{cases}$$



$$H_{\text{дин}}^* = H_{\text{пл}} - \frac{P_{\text{пл}}}{\gamma}$$

$$t^* = \frac{F}{Q_0} \cdot [H_{\text{дин}}^* - H_0]$$

$$\dot{p}_{\text{заб}}(t^{**}) = -\frac{Q_0}{C} \left(1 - \alpha(t^{**} - t^*) + \frac{4}{3} \cdot \frac{\beta(t^{**} - t^*)^{3/2}}{\sqrt{\pi}} - \frac{\gamma'(t^{**} - t^*)^2}{2} + \dots \right)$$



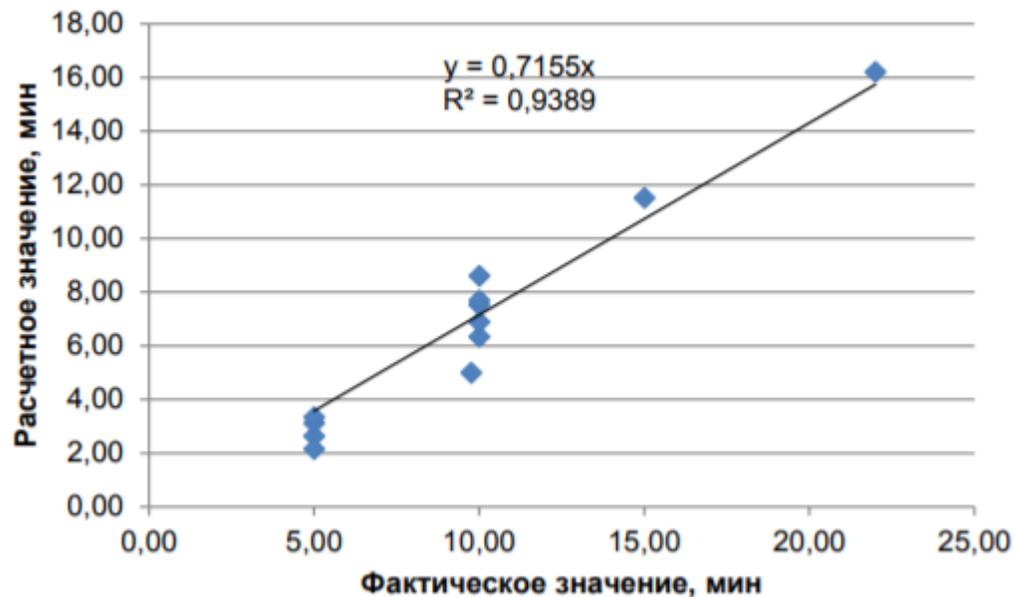
$$t^{**}$$



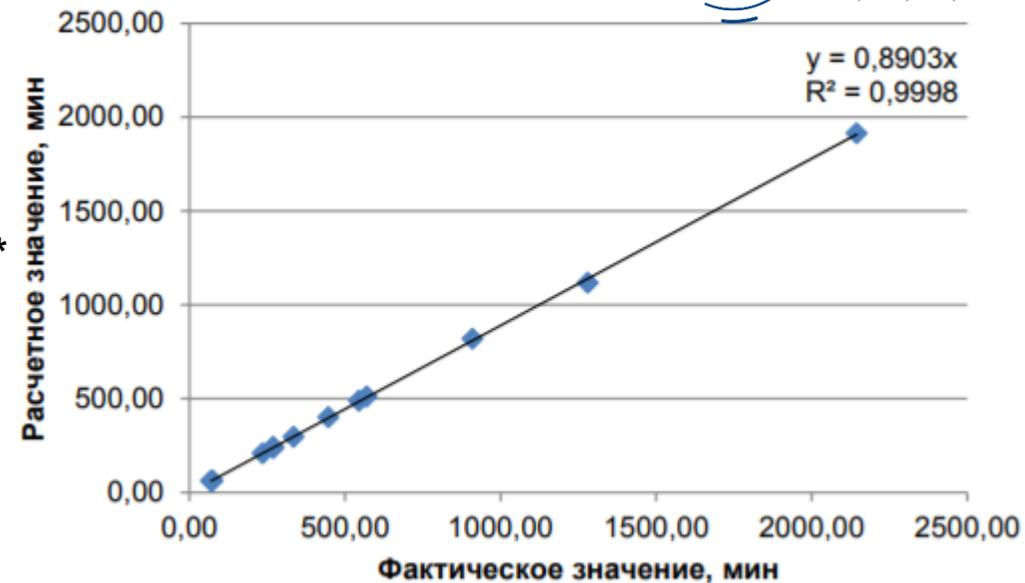
$$H_{\text{дин}}(t^{**}) = H_{\text{пл}} - \frac{p_{\text{заб}}(t^{**})}{\rho_{\text{ж.гл.г}}}$$

Результаты решения прямой задачи

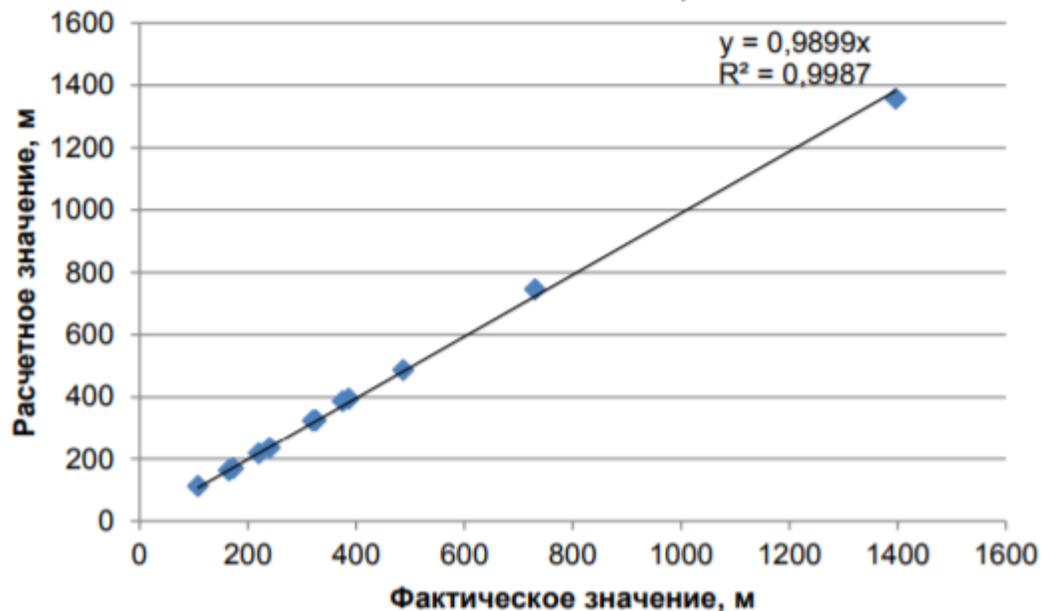
t^*



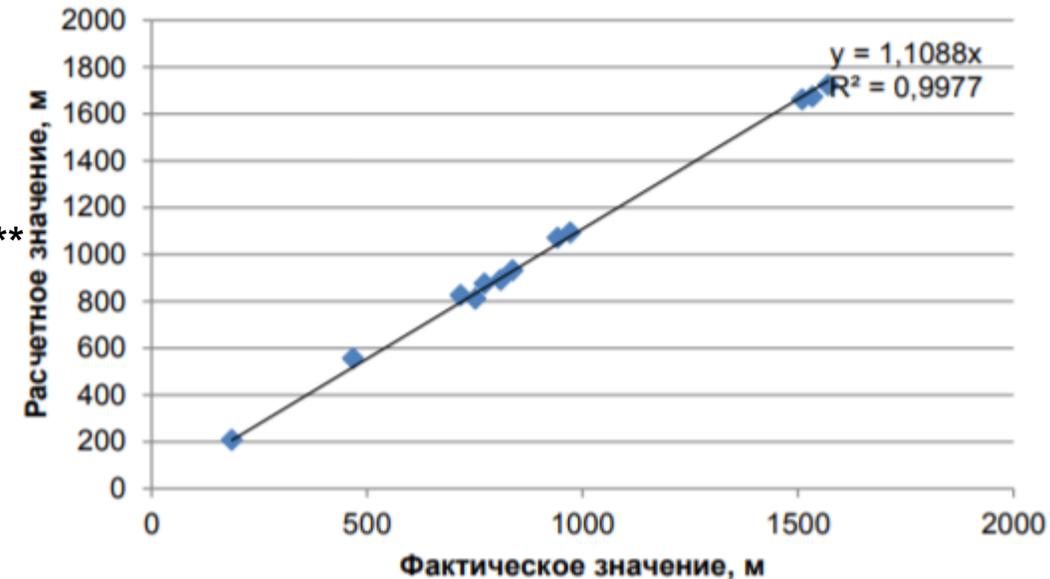
t^{**}

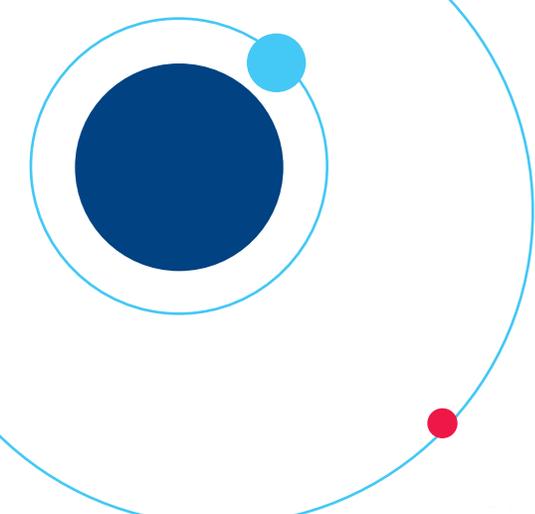


H^*



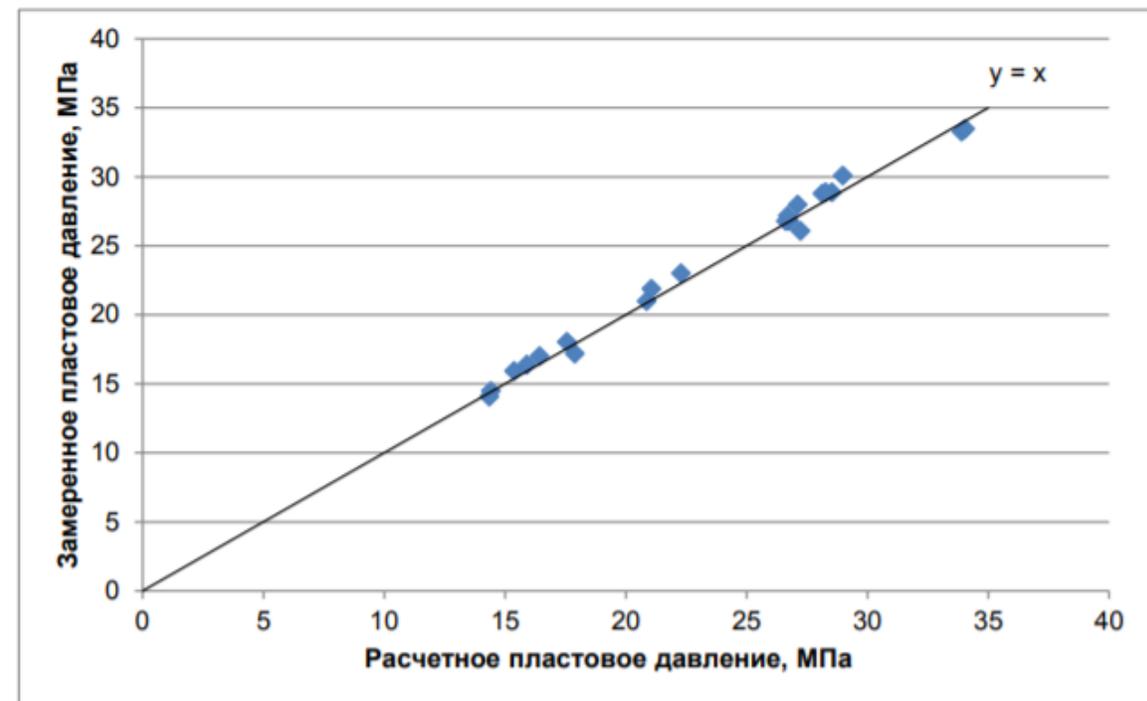
H^{**}

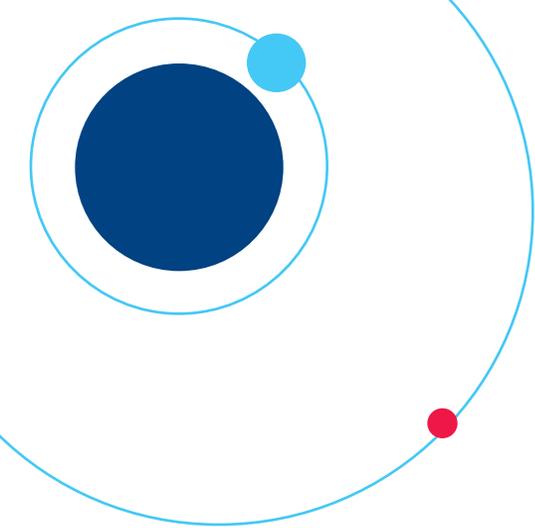




Решение обратной задачи. Определение пластового давления

$$\begin{cases} p_{\text{заб}}(t) = \gamma h_0 - \frac{\gamma Q_0}{F} t, & \text{при } 0 < t < t^* \\ p_{\text{заб}}(t) = p_{\text{пл}} - \frac{Q_0}{C} \left((t - t^*) - \frac{\alpha(t - t^*)^2}{2} + \frac{8}{15} \frac{\beta(t - t^*)^{5/2}}{\sqrt{\pi}} - \frac{\gamma'(t - t^*)^3}{6} + \dots \right), & \text{при } t > t^* \end{cases}$$





Решение обратной задачи. Определение ФЕС продуктивного пласта

$$\begin{cases} p_{заб}(t) = \gamma h_0 - \frac{\gamma Q_0}{F} t, & \text{при } 0 < t < t^* \\ p_{заб}(t) = p_{на} - \frac{Q_0}{C} \left((t - t^*) - \frac{\alpha(t - t^*)^2}{2} + \frac{8}{15} \frac{\beta(t - t^*)^{5/2}}{\sqrt{\pi}} - \frac{\gamma'(t - t^*)^3}{6} + \dots \right), & \text{при } t > t^* \end{cases}$$

$$P_{заб} = y = a_0 - a_1 x + a_2 x^2 - a_3 x^{\frac{5}{2}} + a_4 x^3$$



$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n a_0 - a_1 x_i + a_2 x_i^2 - a_3 x_i^{\frac{5}{2}} + a_4 x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i = \sum_{i=1}^n a_0 x_i - a_1 x_i^2 + a_2 x_i^3 - a_3 x_i^{\frac{7}{2}} + a_4 x_i^4 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 = \sum_{i=1}^n a_0 x_i^2 - a_1 x_i^3 + a_2 x_i^4 - a_3 x_i^{\frac{9}{2}} + a_4 x_i^5 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^{\frac{5}{2}} = \sum_{i=1}^n a_0 x_i^{\frac{5}{2}} - a_1 x_i^{\frac{7}{2}} + a_2 x_i^{\frac{9}{2}} - a_3 x_i^5 + a_4 x_i^{\frac{11}{2}} \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^3 = \sum_{i=1}^n a_0 x_i^3 - a_1 x_i^4 + a_2 x_i^5 - a_3 x_i^{\frac{11}{2}} + a_4 x_i^6 \end{cases}$$



$$\begin{cases} a_0 = P_i \\ a_1 = \frac{Q_0 \gamma}{F} \\ a_2 = \frac{\pi k h \gamma^2 Q_0}{\mu S F^2} \\ a_3 = \frac{16 \sqrt{\pi} k h \gamma^2 Q_0 \sqrt{\chi}}{15 \mu S^2 F^2 r_w} \\ a_4 = \frac{\pi k h \gamma^2 \chi Q_0}{6 \mu S^2 F^2 r_w^2} \end{cases}$$

Определение ФЕС продуктивного пласта. Результаты апробации

Месторождение	№скв.	$P_{пл}$, МПа	χ , м ² /с	S	k, мкм ²
Ново-Запрудненское	4	18,3	0,00007	5,9	0,332
Грековское	52	24,3	0,000012	-1,24	0,224
Ветлянское	232	17,9	0,00013	1,34	0,005
Кулешовское (выводилась в 2015 году)	1119	17	0,0219	0,22	0,215
Южно – Орловское	31	17,3	0,00006	-3,6	0,134
Сколковское	9	18,7	0,005	16	0,750
Волгановское	12	19,7	0,0047	8	0,263
Волгановское (горизонт)	13	13,9	0,0034	-3	0,754
Северо – Каменское	14	13,3	0,0001	1,2	0,268
Кулешовское (выводилась в 2014 году)	1119	16,5	0,0112	0,3	0,223

Заключение



- 1) Разработаны физико-математические модели нестационарной работы системы «Пласт-Скважина-Насос» при выводе на режим при эксплуатации однородного пласта и неоднородного пласта (двойная проницаемость).
- 2) Показана возможность использования математических моделей для решения прямой и обратной задач, решение которых позволят оптимизировать проведение технологической операции по выводу скважины на режим (решение прямой задачи), определять фильтрационно-емкостные параметры продуктивного пласта

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00248». Авторы выражают благодарность фонду РФФИ.



СПАСИБО

Самарский государственный
технический университет

<https://samgtu.ru/>

π