

## НАГРЕВ НЕФТЕГАЗОВЫХ СИСТЕМ С ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

М.А.Фатыхов, А.И.Худайбердина, Ю.Ю. Бикбова

*Башкирский государственный педагогический университет им.М.Акумлы, г.Уфа, Россия*

Известно, что большую роль в процессе закачки кислоты в карбонатный пласт играет кинетика химической реакции. В частности, явление образования так называемых «червоточин» является результатом конкурирующих процессов скорости фильтрации и скорости химической реакции. Поэтому распределение оторочки закачиваемой кислоты и интенсивности ее реакции с карбонатными минералами является сложной задачей.

В настоящей работе проведены расчетные исследования пространственно-временных распределений температуры после мгновенной закачки, когда основные процессы взаимодействия кислоты со скелетом происходят после прекращения движения раствора в пласте, и осуществлен анализ вклада различных физических процессов в зависимости от коэффициента поглощения электромагнитных волн в пласте.

Рассмотрена температурная задача в цилиндрической системе координат, где среда представлена тремя областями с плоскими границами раздела ( $z = h$ ), перпендикулярными оси  $z$  (рис. 1). Первая и вторая области непроницаемы, средняя область толщиной  $h$  является пористой. Закачка реагента в область  $0 < z < h$  производится из скважины радиусом  $r_0$ , ось которой совпадает с осью  $z$ . В описании температурной задачи принимаются следующие допущения: пористый карбонатный пласт считается однородным и анизотропным по гидродинамическим и теплофизическим свойствам; породы, окружающие пласт, предполагаются непроницаемыми и анизотропными по теплофизическим свойствам. Пренебрегается также различие теплопроводности зоны раствора кислоты в пласте и зоны вытесненной нефти, а также зависимость коэффициента теплопроводности от радиальной координаты. Источник, связанный со скважиной, излучает электромагнитные волны в радиальном направлении.

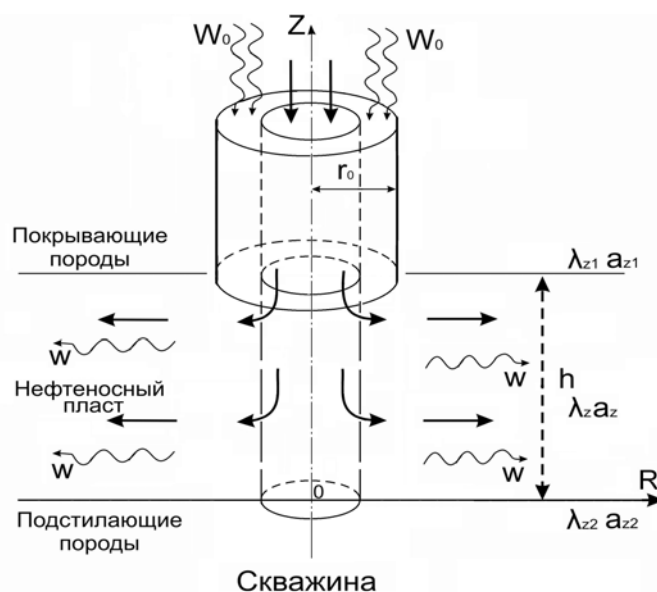


Рис. 1. Геометрия задачи

В рамках указанной модели процесс нагрева пласта и прилегающих пород описывается уравнением теплопроводности с объемными источниками  $Q^e$  и  $Q^c$ , где

$$Q^c = Lq_d, \quad (1)$$

$$Q^e = \frac{\alpha W}{2\pi r H} \exp[2\alpha(r_0 - r)], \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\pi f \sqrt{\varepsilon}}{c} \operatorname{tg} \delta \quad (3)$$

Математическая модель, описывающая рассматриваемый процесс сводится к следующей системе уравнений:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_{r1} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + a_{z1} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}, z > h, r > 0, t > 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_{r2} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + a_{z2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}, z < 0, r > 0, t > 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Lq_d}{c_{p.liq}} + \frac{\alpha W}{\pi r H c_{p.liq}} \exp(-2\alpha(r - r_0)), \quad (6)$$

$$0 < z < h, r > 0, t > 0$$

$$q_d = \alpha(m) \rho_a, \quad (7)$$

$$\alpha(m) = \alpha_0 \sqrt{m(1-m)}, \quad (8)$$

Коэффициентами скорости реакции и пористости определяются время  $t$  обработки пласта и плотность  $\rho_a$  [1]:

$$\int_{m_0}^m \frac{mdm}{[m - m_0(1 + \rho_{a0}/(v\rho_s))]\alpha(m)} = -vt, \quad (9)$$

$$\rho_a = \rho_s v \left( \frac{m_0}{m} \left( 1 + \frac{\rho_{a0}}{v\rho_s} \right) - 1 \right). \quad (10)$$

На границах пласта с покрывающей и подстилающей породами заданы условия равенства температур и тепловых потоков:

$$T \Big|_{z=h} = T_1 \Big|_{z=h}; \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} = \lambda_{z1} \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=h}; \quad (11)$$

$$T \Big|_{z=0} = T_2 \Big|_{z=0}; \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \lambda_{z2} \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0}. \quad (12)$$

Температурные возмущения в начальный момент времени равны:

$$T \Big|_{t=0} = T_1 \Big|_{t=0} = T_2 \Big|_{t=0} = T_0, \quad (13)$$

Граничное условие на бесконечности и на оси скважины представлены в виде:

$$\lim T_i \Big|_{r+z \rightarrow \infty} = T_0, \quad (14)$$

$$\frac{dT_i}{dr} \Big|_{r=0} = 0. \quad (15)$$

Нижние индексы  $i=1$  и  $2$  относятся к параметрам покрывающей и подстилающей пород соответственно.

Решение предполагается ограниченным и симметричным на оси продольной координаты.

Были произведены расчеты температурных полей при широком наборе значений параметров, входящих в систему уравнений и формул (1) – (15):  $\alpha_0=0.01 \text{ с}^{-1}$ ,  $W=50000 \text{ Вт}$ ,  $\lambda_{z2}=\lambda_{z1}=0.903 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ,  $a_{z1}=a_{z2}=a_{r1}=a_{r2}=35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $a_z=a_r=44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $c_{p.liq}=2.501 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}$ ,  $h=5 \text{ м}$ ,  $L=830 \text{ кДж/кг}$ ,  $\rho_a=212.5 \text{ кг/м}^3$ ,  $r_0=0.084 \text{ м}$ ,  $k=0.73$ ,  $\rho_s=2600 \text{ кг/м}^3$ ,  $m_0=0.3$ ,  $\alpha=0,001 \div 1 \text{ м}^{-1}$ . Для получения решений был использован конечно-разностный метод. Данные, представленные на рис. 2 – 9, соответствуют временам: 1 – 1 ч, 2 – 5 ч, 3 – 10 ч, 4 – 20 ч, а на рис. 10 – коэффициентам поглощения  $\alpha$ ,  $\text{м}^{-1}$ : 1 – 1 – 0,1; 2 – 0,08; 3 – 0,06; 4 – 0,04; 5 – 0,02.

Как видно из рис. 2, распределение температуры в пласте по его толщине неравномерное: температура в середине пласта больше, чем в покрывающей и подстилающей породе. С увеличением времени воздействия эта неравномерность уменьшается, что связано с потерями тепла в подстилающие и покрывающие породы и уменьшением реакционной способности кислоты со временем.

Сравнение рис. 2 и 3 показывает принципиальное отличие в распределении температуры в пласте по его толщине при закачке соляной кислоты и высокочастотном электромагнитном воздействии. С увеличением времени воздействия неравномерность нагрева пласта в высокочастотном электромагнитном поле растет, что связано только с потерями тепла в покрывающие и подстилающие породы.

Рис. 3 также свидетельствует также о том, что система « покрывающие породы – пласт - подстилающие породы» представляет собой волновод. В нем температурное поле практически полностью сосредоточено в пласте. Эффективность использования энергии электромагнитного поля для глубокого нагрева в этом случае выше, чем при закачке кислоты, т. е. энергией, выделяемой при взаимодействии кислоты с карбонатосодержащей породой.

Из рис. 4 следует, что закачка кислоты в высокочастотном электромагнитном поле позволяет повысить температуру в середине пласта при длительных воздействиях по сравнению с отдельной закачкой кислоты и достигается более равномерный нагрев пласта по его толщине в течение всего процесса воздействия.

Рис. 5 иллюстрирует зависимость изменения температуры в пласте при закачке кислоты. Отсюда следует, что со временем температура на забое скважины уменьшается, а в пласте увеличивается, что указывает на уменьшение градиента температуры. При объемном нагреве пласта высокочастотным электромагнитным излучением наблюдается следующая закономерность: температура на забое скважины и в пласте со временем растет. Причем скорость роста температуры на забое выше, чем в пласте (рис.6). Поэтому градиент температуры при этом методе воздействия со временем увеличивается. Эта закономерность полезна для увеличения эффективности солянокислотной обработки пласта, что следует из рис. 7. Из данного рисунка видно, что глубина теплового воздействия на пласт которая достигается закачкой кислоты, увеличивается в несколько раз при совмещении закачки кислоты с высокочастотным электромагнитным воздействием.

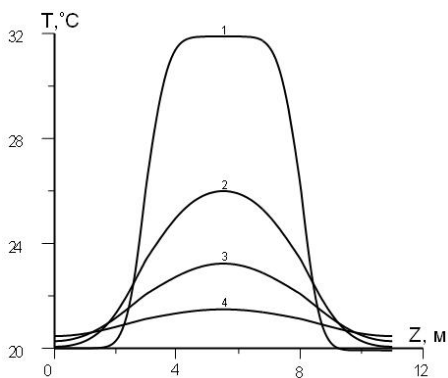


Рис. 2. Изменение температуры пласта в продольном направлении при закачке кислоты ( $r=1\text{м}$ )

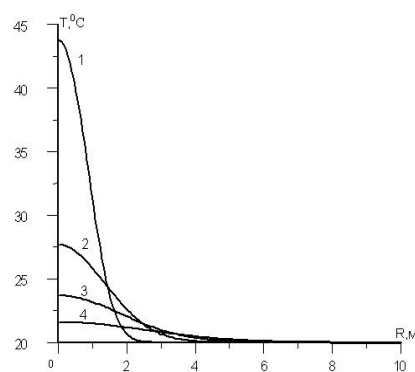


Рис. 5. Изменение температуры пласта в радиальном направлении при закачке кислоты ( $z=1\text{м}$ )

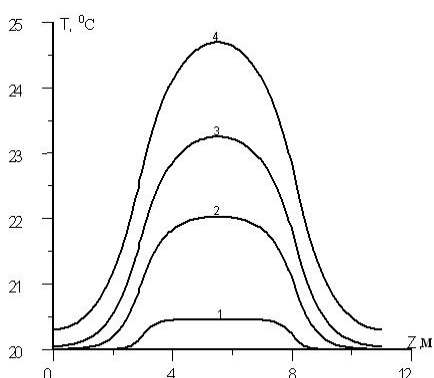


Рис. 3. Изменение температуры пласта в продольном направлении при воздействии ВЧ ЭМП ( $r=1\text{м}$ )

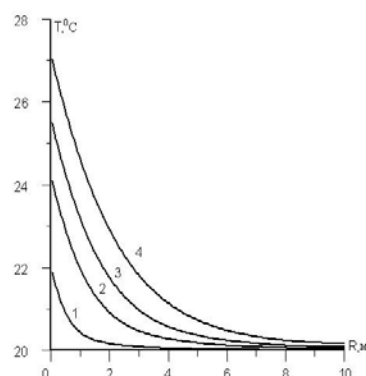


Рис. 6. Изменение температуры пласта в радиальном направлении при воздействии ВЧ ЭМП ( $z=1\text{м}$ )

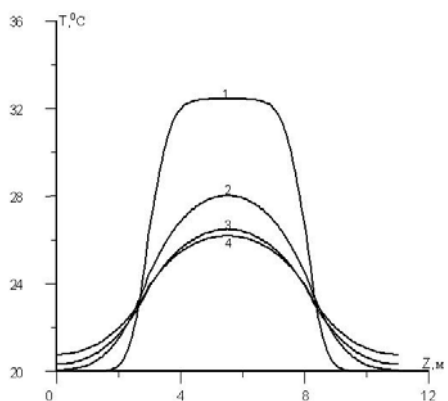


Рис. 4. Изменение температуры пласта в продольном направлении при совместном воздействии кислоты и ВЧ ЭМП ( $r=1\text{м}$ )

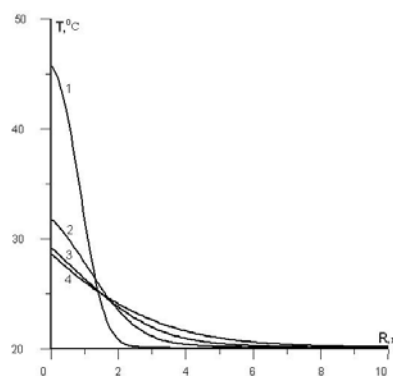


Рис. 7. Изменение температуры пласта в радиальном направлении при совместном воздействии кислоты и ВЧ ЭМП ( $z=1\text{м}$ )

Из рис. 6 и формулы (2) следует, что в высокочастотном электромагнитном поле в реальных условиях температура на забое скважины может нагреваться до очень высоких нежелательных температур, приводящих к разложению нефти вблизи скважины, образованию кокса и др. Рис. 7 показывает на возможность использования этого отрицательного эффекта для увеличения температуры как на забое скважины, так и в пласте при его обработке соляной кислотой.

Размер прогретой зоны, определяемый глубиной проникновения  $l$  некоторой фиксированной изотермы, при фиксированной мощности источника и толщине пласта зависит от теплофизических параметров среды и коэффициента поглощения  $\alpha$ . ( $\alpha = 1/l$ ). Последний, в свою очередь, зависит от частоты электромагнитного излучения, и им, следовательно, можно управлять. При малом  $\alpha$  (большая глубина проникновения излучения  $l$ ) энергия источника рассеивается в большой области и растекается в прилегающие породы, не производя необходимого нагрева. При большом  $\alpha$  (малая глубина  $l$ ) происходит сильный нагрев небольшой области, окружающей источник, возникает существенный градиент температуры, и тепло интенсивно растекается вверх и вниз в прилегающие породы, не обеспечивая необходимого радиального прогрева. В обоих случаях прогретая зона мала, нагрев неэффективен. Имеется, следовательно, некоторый оптимальный коэффициент поглощения, при котором (при фиксированной мощности источника) может быть получен наибольший размер прогретой зоны. Очевидно, существует также и оптимальное время нагрева (при каждом значении  $\alpha$ ), при котором отношение объема прогретой зоны к затраченной энергии максимально.

В связи с этим на рис. 8 - 9 приведены результаты подробных расчетных исследований пространственно- временного распределения температуры в пласте при закачке кислоты в высокочастотном электромагнитном поле в зависимости от значения коэффициента поглощения электромагнитных волн.

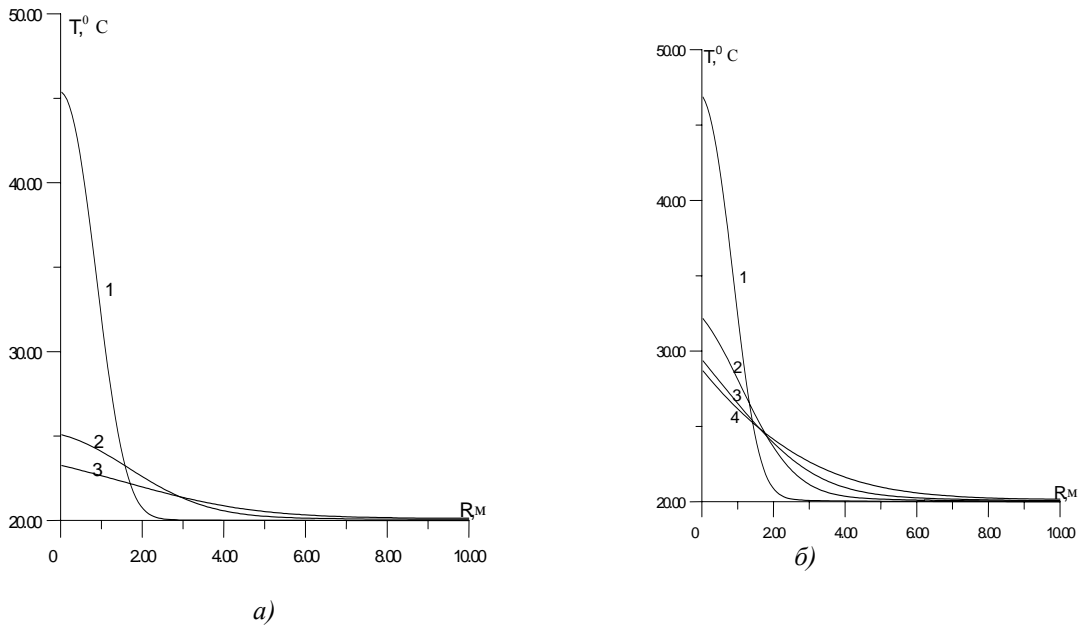


Рис.8. Изменение температуры пласта в радиальном направлении при совместном воздействии полей ( $z=1\text{м}$ ) при коэффициентах поглощения электромагнитных волн,  $\alpha, \text{м}^{-1}$ : *a* - 0,02; *б* - 0,1.

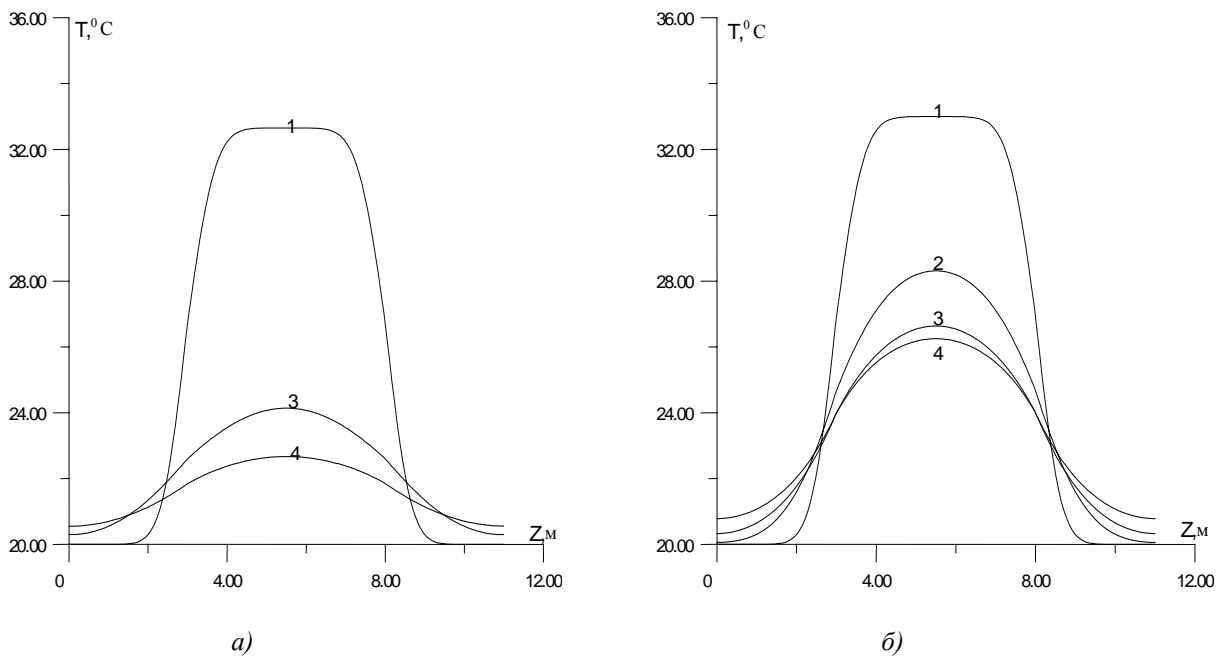
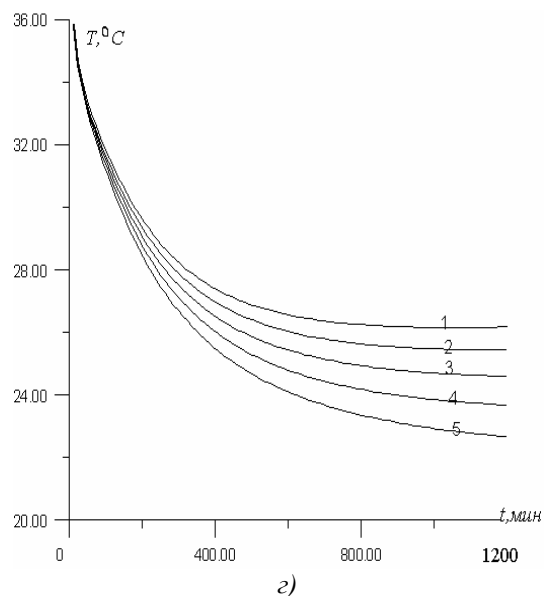
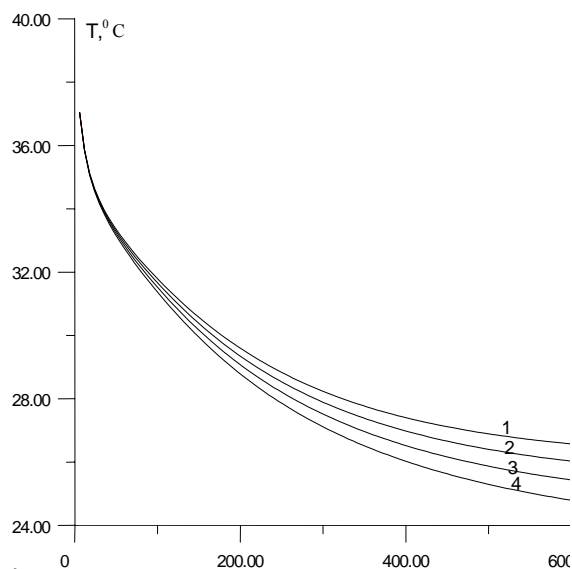
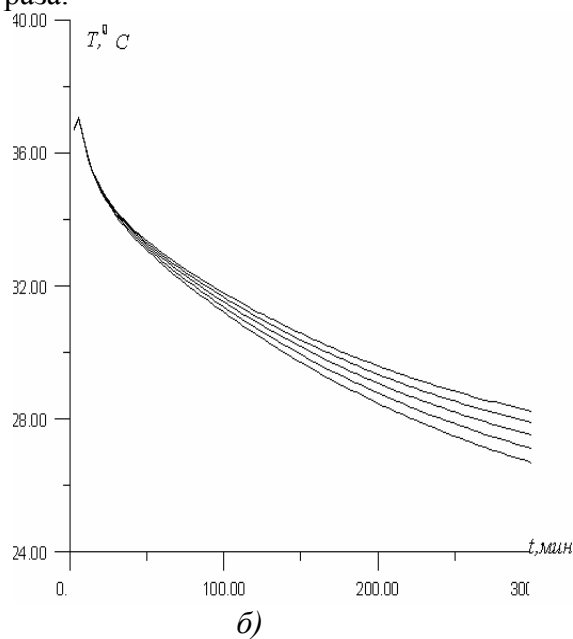
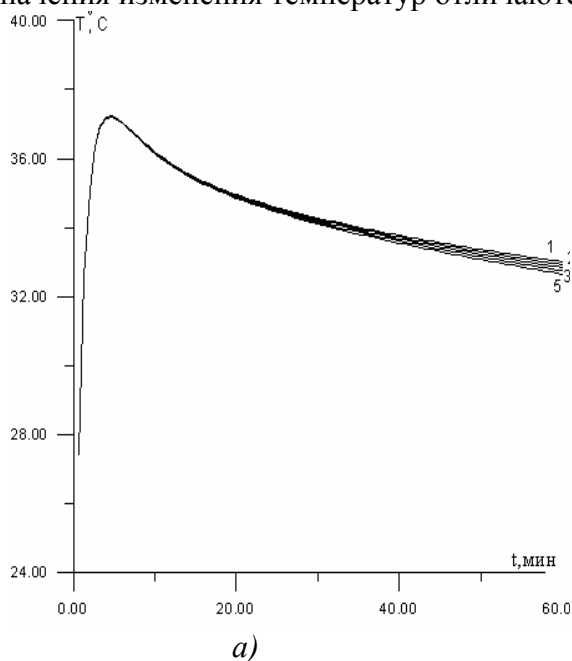


Рис.9. Изменение температуры пласта в продольном направлении при совместном воздействии полей ( $r=1\text{м}$ ) при коэффициентах поглощения электромагнитных волн,  $\alpha, \text{м}^{-1}$ : *a* - 0,02; *б* - 0,1.

Как видно из рис. 8, *a* и *б*, температура на забое скважины увеличивается с увеличением значения данного параметра. При этом градиент температуры в радиальном направлении уменьшается, значение уменьшения его возрастает с повышением значения коэффициента поглощения электромагнитных волн. Глубина теплового воздействия увеличивается незначительно. Однако значение средней температуры в области нагрева значительно повышается. Вместе с тем, увеличивается градиент температуры в продольном направлении, что следует из рис. 9, *a* и *б*. Следовательно, середина пласта нагревается быстрее, вблизи кровли и подошвы пласта скорость изменения температуры уменьшается,

повышается температура окружающих пласт пород. Скорость повышения этой температуры меньше, чем скорость увеличения температуры в середине пласта. В случае нагрева среды только в высокочастотном электромагнитном поле данная закономерность проявляется с точностью наоборот, что видно из рис. 3.

Наибольший интерес имеют данные, представленные на рис.10. При малых временах совместного воздействия полей (рис. 10, *а*) температура в пласте сначала увеличивается очень быстро, затем достигает максимального значения, достаточно резко снижается, стремясь к стационарному значению. Начальный этап нагрева не зависит от значения коэффициента поглощения электромагнитных волн. Различие значений температуры несколько сказывается на этапе стремления температуры к стационарному значению. С увеличением продолжительности воздействия значение максимума температуры уменьшается, а положение его сдвигается в сторону малых времен и исчезает при больших продолжительностях воздействия. Между тем, температура при этом сильно зависит от коэффициента поглощения электромагнитных волн. Например, при продолжительностях нагрева 20 ч и 10 ч и различии коэффициента поглощения электромагнитных волн в пять раз значения изменения температур отличаются в 2 раза.



в)

Рис.10. Динамика изменения температуры пласта при совместном воздействии полей ( $r=1\text{м}$ ) для различных времен в ч: а) – 1; б) – 5; в) – 10; г) – 20.

Таким образом, построена математическая модель нагрева карбонатосодержащего нефтяного пласта при совместном воздействии соляной кислоты и высокочастотного электромагнитного поля. На основе математического моделирования исследованы пространственно – временные распределения температуры при раздельном и совместном воздействиях. Установлена возможность увеличения глубины обработки пласта закачкой кислоты в высокочастотном электромагнитном поле. Особенности нагрева карбонатосодержащей пористой среды в высокочастотном электромагнитном поле при закачке соляной кислоты существенно зависит от значений коэффициента поглощения электромагнитных волн, а, следовательно и от их частоты.

### Обозначения

$f$  – частота электромагнитного излучения, Гц;  $c$  – скорость света в вакууме, м/с;  $\varepsilon$  и  $tg\delta$  – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь насыщенной пористой среды,  $a_{ri}$ ,  $a_{zi}$  – коэффициенты радиальной и вертикальной температуропроводности  $i$ -го слоя,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c_{p.liq}$  – объемная теплоемкость пласта,  $\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{м}^3)$ ;  $h$  – толщина пласта, м;  $r$  и  $z$  – цилиндрические координаты, м;  $T_i$  – температура  $i$ -той зоны,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T$  – температура нефтеносного пласта,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  – время, с;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{К}\cdot\text{м})$ ;  $W$  – мощность ВЧ генератора, Вт;  $H$  – высота излучателя, м;  $r_0$  – радиус скважины, м;  $L$  – удельная теплота реакции,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $q_d$  – плотность источников массы,  $\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$ ;  $\rho_a$  – плотность кислоты в растворе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\alpha(m)$  – коэффициент скорости реакции, зависящий от коэффициента пористости  $m$ ,  $1/\text{с}$ ;  $\alpha_0$  – коэффициент скорости реакции,  $1/\text{с}$ ;  $\rho_s$  – плотность скелета,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $\nu$  – стехиометрический коэффициент,  $m_0$  – начальная пористость,  $\rho_{a0}$  – начальная плотность кислоты в растворе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $T_0$  – начальная температура сред (пласта, покрывающей и подстилающей породы),  $^{\circ}\text{C}$ .

### Литература

1. Филиппов А.И., Филиппов К.А., Михайлов П.Н., Багаутдинов Р.Н., Потапов А.А. Температурные поля при кислотном воздействии на нефтегазовые пласты // ИФЖ. 2005. Т. 78, № 2. С.51 - 65.