

Выводы

1. Разработана методика расчета равновесных параметров углеводородов, воды и паров воды, предназначенная для определения структуры и параметров газожидкостных потоков в скважинах, промысловых и магистральных трубопроводах.

2. Предложен и обоснован путем сопоставления с известными тестовыми расчетами алгоритм и программный блок, позволяющий определять параметры характеризующие структуру газожидкостного потока, представляющего собой смесь углеводородов, воды и паров воды при различных составах среды, расходах и термобарических условиях в трубопроводах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саранчин Н.В., Кутрунов В.Н. Метод автоматизации расчета параметров течения нефтегазовой смеси в трубопроводах. Нефть и газ. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2006.
2. Бучинский С.В., Шабаров А.Б., Бурбасов А.Н. Моделирование гидратообразования при сборе природного газа // Вестник ТюмГУ. Вып. 6. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. С. 28-33.
3. Antoine C. «Tensions des vapeurs; nouvelle relation entre les tensions et les temperatures», Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, 107, 681-684, 778-780, 836-837; 1888.
4. Земенков Ю.Д. и др. Эксплуатация оборудования и объектов газовой промышленности: Учеб. пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2008. 1216 с.
5. Луканин В.Н. и др. Теплотехника: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2000. 671 с.
6. Уэйлес, С. Фазовые равновесия в химической технологии. М.: Мир, 1989. 608 с.
7. Брилл Дж. П., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 384 с.

*Сергей Михайлович СЫСОЕВ —
доцент кафедры экспериментальной физики
Сургутского государственного университета,
кандидат физико-математических наук
smsysoev57@mail.ru*

*Анатолий Александрович КИСЛИЦЫН —
зав. кафедрой микро- и нанотехнологий
Тюменского государственного университета,
доктор физико-математических наук
akislicyn@utmn.ru*

УДК 532.546:536.421:537.868

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НЕФТЕСОДЕРЖАЩЕМ ПЛАСТЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN OIL-BEARING BED UNDER THE ACTION OF MICROWAVE

АННОТАЦИЯ. Методом конечных элементов проведено численное исследование двумерной осесимметричной математической модели прогрева высоковязкой нефти в пласте СВЧ-излучением. Получены пространственные и временные распределения напряженностей электромагнитного поля, объемных тепловых источников и тем-

пературы в пласте. Исследован процесс фазового перехода в нефти под действием СВЧ-излучения.

SUMMARY. A computational investigation of two-dimensional axisymmetric mathematical model of high-viscosity oil bed heating under the action of microwave has been carried out with finite element method. Space and temporary distributions of electromagnetic field strengths, volume heat sources and temperature in the bed have been obtained. A process of phase change in the heated oil under the action of microwave has been investigated.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Нефтяной пласт, электромагнитное излучение, теплоперенос, тангенс угла потерь, фазовый переход, поле температур.

KEY WORDS. Oil bed, electromagnetic radiation, heat transfer, dielectric dissipation, phase change, temperature field.

Применение высокочастотного электромагнитного излучения — перспективный способ интенсификации добычи высоковязких нефтей. Об этом свидетельствуют результаты лабораторных и промысловых испытаний в России [1], [2] и опыт практического использования данной технологии в промышленных масштабах в США и Канаде [3], [4]. Традиционные методы теплового воздействия на призабойную зону скважины нагретым паром или горячей жидкостью в некоторых случаях малоэффективны [5], [6]. Кроме того, их широкомасштабное применение может повлечь тяжелые экологические последствия в виде нарушений гидрогеологической обстановки. Разогрев продуктивных пластов сверхвысокочастотным электромагнитным излучением (СВЧ-излучением) способен обеспечить (по сравнению с традиционными способами) более высокую скорость и равномерность нагрева, возможность оптимального управления и автоматизации технологического процесса, а также практически исключить вредное воздействие на окружающую среду. Однако эффективная реализация возможностей применения СВЧ-излучения тормозится из-за отсутствия надежных данных по исследованию процессов тепломассопереноса в многофазных средах, характерных для нефтегазовой технологии, при воздействии на эти среды СВЧ-излучением. Основная задача, которая при этом ставится, заключается в том, чтобы на моделях, максимально приближенных к реальным условиям, определить оптимальные режимы воздействия на пласт.

Постановка задачи. Система уравнений. В работе исследовались процессы, связанные с фазовыми переходами и движением границы раздела фаз в нефти при ее нагреве объемными источниками тепла, возникающими в результате поглощения СВЧ-излучения.

Исследование проводилось на двумерной осесимметричной модели, изображенной на рис. 1, где z — ось симметрии. Нефтяной пласт (2) заключен между плоскостями, перпендикулярными оси z (1 — кровля, 3 — подошва пласта). Сверху и снизу пласт окружает неограниченная среда, тепло- и электрофизические характеристики которой отличаются от характеристик пласта. В скважину на уровне середины нефтяного пласта помещен источник СВЧ-излучения (4) с коаксиальной щелевой антенной. Антенна представляет собой короткозамкнутый на конце коаксиальный кабель: 5 и 6 — внутренний и внешний проводники кабеля), имеющий кольцевую щель (7) во внешнем проводнике. Параметры антенны для каждой из используемых частот излучений выбирались следующим образом: ширина щели антенны равна четверти длины волны излучения, расположение щели соответствует пучности стоячей волны в короткозамкнутом коаксиальном кабеле, изолинии напряженности

магнитной компоненты электромагнитного поля в коаксиальном кабеле и в системе «пласт–окружающие породы». Электромагнитное поле в пласте, создаваемое такой антенной, также имеет осевую симметрию: электрическая составляющая представлена радиальным компонентом E_r , а магнитная — азимутальным H_φ . Считается, что действие СВЧ-излучения проявляется только в создании теплового эффекта, а именно в возникновении объемных источников тепла, мощность и распределение которых определяются электрофизическими параметрами среды, мощностью источника излучения, частотой электромагнитных волн и диаграммой направленности антенны. В свою очередь, тепловой эффект приводит к изменению температуры среды, вследствие чего изменяются электрофизические параметры среды, влияющие на условия распространения СВЧ-излучения, и, следовательно, протекающие процессы оказываются взаимосвязанными. Прогрев пласта моделируется при закрытой скважине, то есть считается, что фильтрационное движение нефти и связанный с ним конвективный перенос тепла отсутствуют.

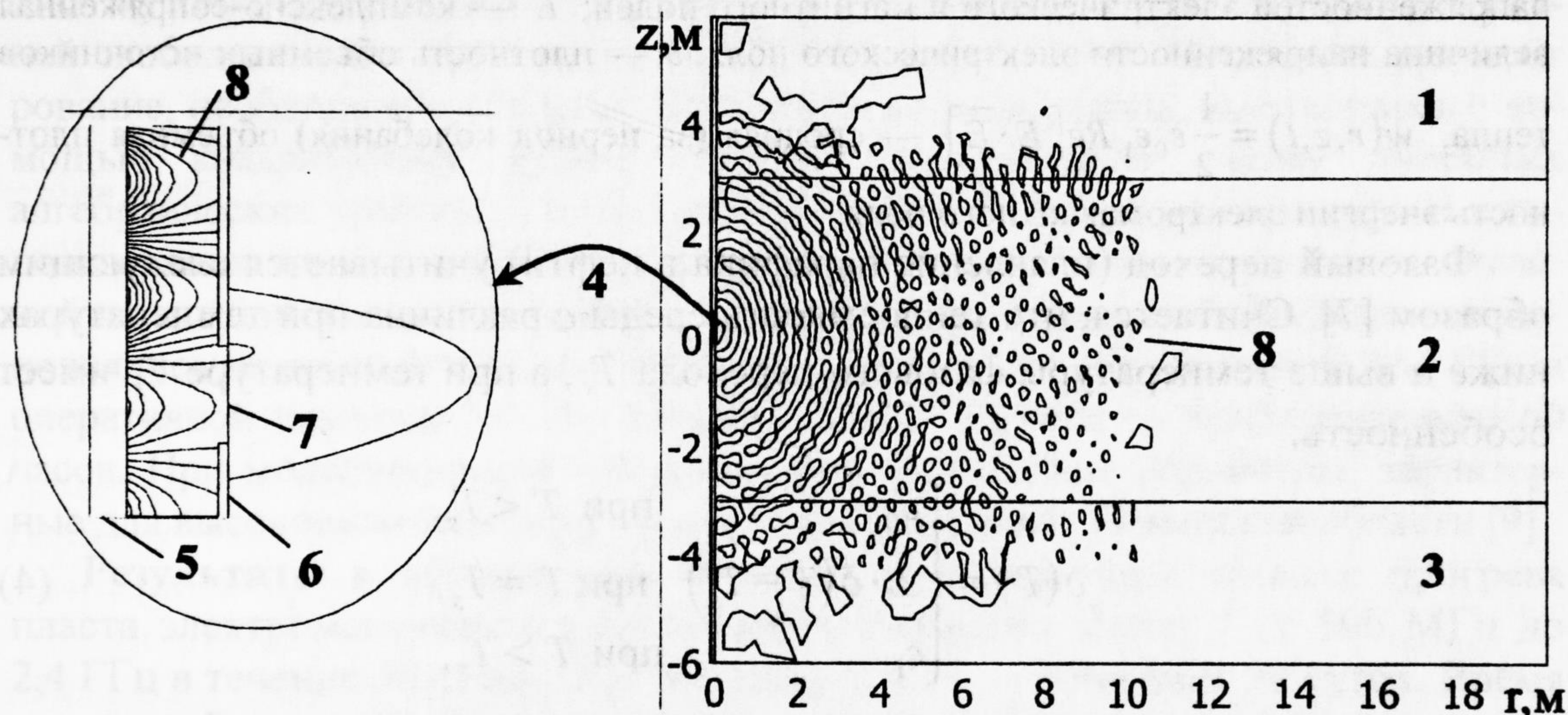


Рис. 1. Геометрическая схема модели: 1 и 3 — кровля и подошва нефтяного пласта 2; 4 — источник излучения с антенной; 5 и 6 — внутренний и внешний проводники коаксиального кабеля-антенны; 7 — кольцевая щель во внешнем проводнике кабеля; 8 — изолинии напряженности магнитной компоненты электромагнитного поля ($f=500$ МГц)

В работе предложена усложненная, по сравнению с применявшимися ранее [7], [8], [9], и более близкая к реальным условиям математическая модель, включающая в себя систему двумерных взаимосвязанных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями. Система состоит из уравнения для электромагнитного поля, с учетом температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь нефти, и уравнения теплопроводности с учетом объемного тепловыделения в среде и фазовых переходов в цилиндрической системе координат:

$$\left(\nabla \times \left(\left(\epsilon_1 - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right)^{-1} \nabla \times \mathbf{H} \right) \right)_\varphi - \mu k^2 H_\varphi = 0, \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_2, \quad \operatorname{tg}\delta = \epsilon_2/\epsilon_1, \quad \sigma = \epsilon_0\omega\epsilon_2 = \epsilon_0\omega\epsilon_1 \operatorname{tg}\delta;$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(r, z, T, t), \quad (2)$$

$$0 \leq r < \infty, \quad -\infty < z < \infty,$$

$$\begin{aligned} q(r, z, T, t) &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[(\sigma - j\omega\varepsilon_1) E \cdot \bar{E} \right] = \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 \omega \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta \operatorname{Re} \left[E \cdot \bar{E} \right] = \omega \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot w(r, z, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где ε — комплексная диэлектрическая проницаемость среды; ε_1 и ε_2 — ее действительная и мнимая части; σ — проводимость среды; ω — циклическая частота электромагнитного поля; ε_0 — электрическая постоянная; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; T — температура среды; c , ρ , k — усредненные по всем фазам теплоемкость, плотность и теплопроводность среды, которые различны в пласте и в прилегающих породах и, следовательно, являются функциями z ; E и H — векторы напряженностей электрического и магнитного полей; \bar{E} — комплексно-сопряженная величина напряженности электрического поля; q — плотность объемных источников тепла, $w(r, z, t) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_1 \operatorname{Re} \left[E \cdot \bar{E} \right]$ — средняя (за период колебания) объемная плотность энергии электромагнитного поля.

Фазовый переход (плавление парафина в нефти) учитывается следующим образом [7]. Считается, что теплоемкость среды c различна при температурах ниже и выше температуры фазового перехода T_s , а при температуре T_s имеет особенность:

$$c(T) = \begin{cases} c_0 & \text{при } T < T_s, \\ L \cdot \delta(T - T_s) & \text{при } T = T_s, \\ c_1 & \text{при } T > T_s, \end{cases} \quad (4)$$

где L — теплота фазового перехода (плавления); $\delta(T - T_s)$ — дельта-функция, которая при численном моделировании заменяется дельтаобразной функцией — «ступенькой» конечной ширины $2\Delta T_s$:

$$c(T) = \begin{cases} c_0 & \text{при } T < T_s - \Delta T_s, \\ \frac{c_0 + c_1}{2} + \frac{L}{2\Delta T_s} & \text{при } T_s - \Delta T_s \leq T \leq T_s + \Delta T_s, \\ c_1 & \text{при } T > T_s + \Delta T_s. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, рассматриваемая задача существенно нелинейна, и ее можно отнести к классу задач Стефана в обобщенной формулировке [10].

Граничные условия на металлических поверхностях записываются как $n \times E = 0$, где n — нормаль к поверхности; на границах пласт-окружающие породы $n \times (E_1 - E_2) = 0$, где E_1 и E_2 — напряженности электрического поля

в пласте и окружающих породах, соответственно; при $r=0$: $E_r = 0$, $\frac{\partial E_z}{\partial r} = 0$.

Пренебрегая теплообменом на поверхности скважины, граничные условия для уравнения теплопроводности можно записать в виде:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=b} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z \rightarrow \pm \infty} \rightarrow 0,$$

где b — радиус скважины.

Начальным условием для уравнения является заданное поле температуры во всей рассматриваемой области: $T(r, z, t)|_{t=0} = T_0$.

Моделирование процесса нагрева пласта выполнялось методом конечных элементов с помощью пакета программ COMSOL Multiphysics [14]. Вычислительный домен задачи разбивался приблизительно на 40 000 конечных элементов, имеющих вид треугольников. Сетка конечных элементов неравномерная: сгущение элементов производилось в областях наиболее сильного изменения температуры и напряженностей электромагнитного поля, то есть вблизи источника излучения и на границах раздела системы «пласт–окружающие породы», где размер конечных элементов был более чем в 10 раз меньше длины волны излучения. В качестве базисных функций использовались кусочно-непрерывные квадратичные полиномы Лагранжа. Число степеней свободы задачи было равно приблизительно 170 000. Численное интегрирование, необходимое для нахождения элементов якобиана, выполнялось с помощью квадратурных формул Гаусса. Для решения систем линейных алгебраических уравнений использовался метод Гаусса, адаптированный к использованию сильно разреженных матриц. Относительная точность вычислений на каждом шаге итерационного процесса составляла 0,01. Вычисления выполнялись на компьютере, имеющем процессор с тактовой частотой 3,33 ГГц и оперативной памятью 3,4 Гб. Типичное время расчета — приблизительно 60 часов. При моделировании использовались физические параметры, характерные для высоковязкой нефти Русского месторождения Тюменской области [9].

Результаты и обсуждение. В работе моделировался процесс прогрева пласта электромагнитным излучением в диапазоне частот f от 500 МГц до 2,4 ГГц в течение 30 суток; для частоты $f=1$ ГГц — в течение 90 суток. Время прогрева было выбрано исходя из того, что типичные времена прогрева, при использовании традиционных методов теплового воздействия, составляют от одного до нескольких месяцев и даже лет [5], [6]. При проведении численного исследования модели, основанной на уравнениях (1) и (2), дополненных соотношением (3), были получены пространственные и временные распределения напряженностей электромагнитного поля, объемной плотности энергии электромагнитного поля, тепловых источников, температур и вязкости нефти. Результаты приведены на рис. 2-6.

Динамика роста температуры в различных областях пласта определяется величиной и характером пространственного распределения плотности объемных источников тепла, возникающих вследствие поглощения электромагнитной энергии. В свою очередь, пространственное распределение плотности объемных источников тепла (3), обусловлено соответствующим распре-

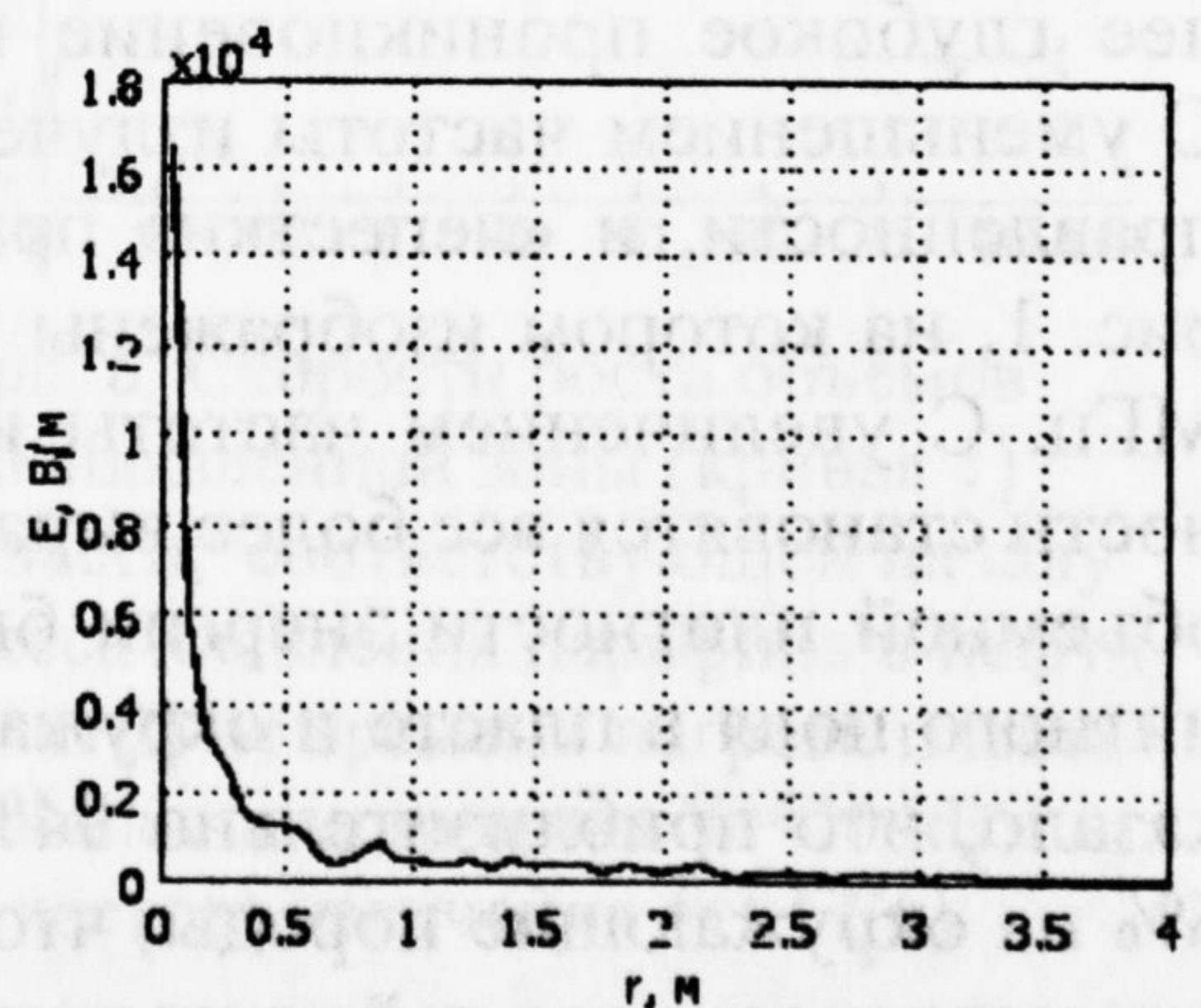


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля от радиального расстояния от источника излучения частотой $f=1$ ГГц и мощностью $W=20$ кВт

делением напряженности электромагнитного поля, а значит, объемной плотностью энергии электромагнитного поля. На рис. 2 приведена зависимость напряженности электрического поля от радиального расстояния от источника излучения. Видно, что напряженность быстро уменьшается при удалении от источника излучения. Так, на расстоянии равном 0,5 метрам, эта величина уменьшилась приблизительно в 16 раз. Таким образом, вблизи источника излучения можно выделить область, размером около 0,5 м, где величина напряженности электрического поля значительно больше, чем в других областях пласта. Внутри этой области происходит наиболее быстрый рост температуры при нагреве СВЧ-излучением, и возможен перегрев нефти до температур выше начала ее термического разложения.

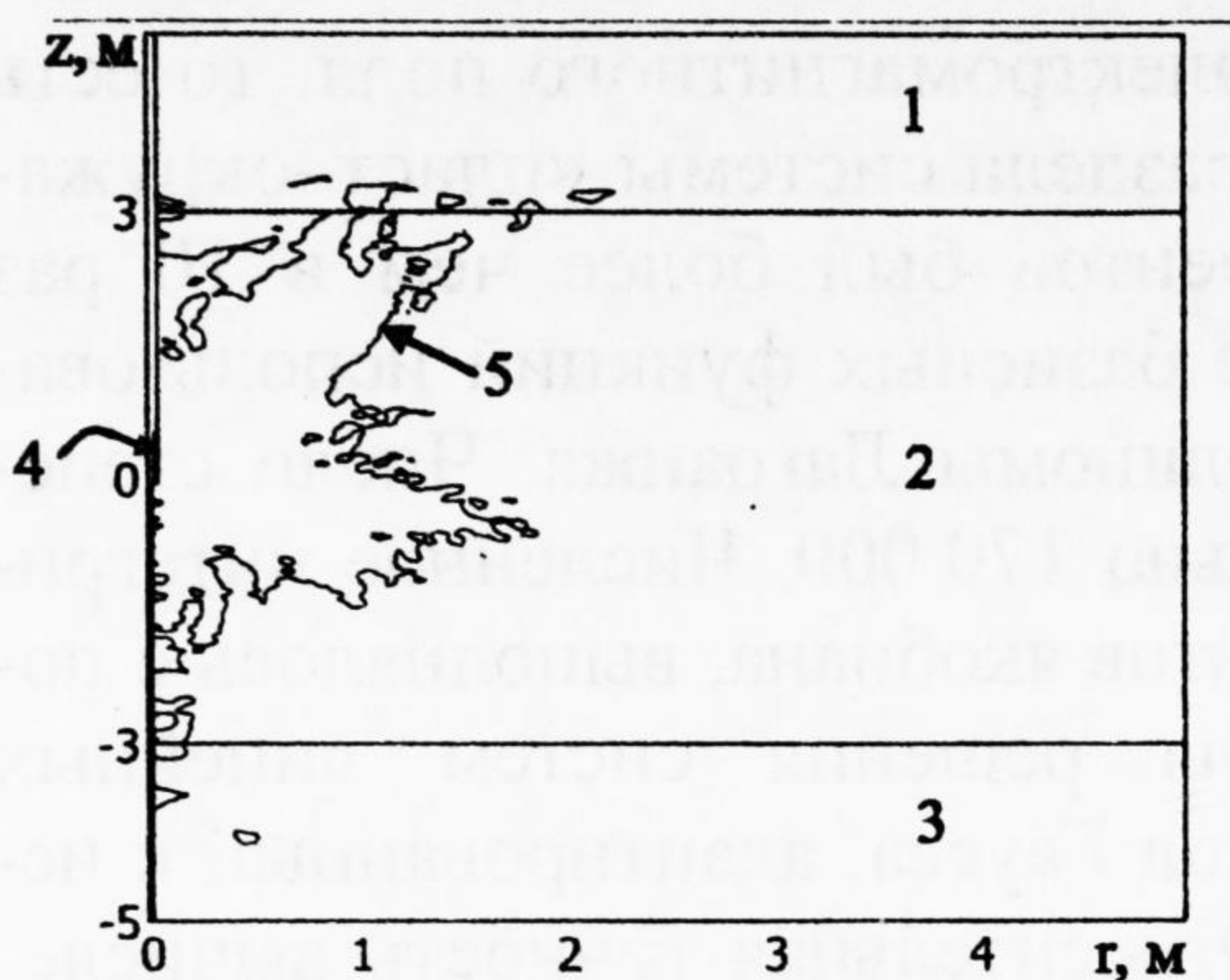


Рис. 3. Диаграмма направленности излучения антенны. 1 и 3 — кровля и подошва нефтяного пласта 2; 4 — источник излучения с антенной; 5 — изолиния объемной плотности электромагнитной энергии $w=5 \cdot 10^{-6}$ Дж/м³; частота излучения $f=1$ ГГц; мощность источника $W=20$ кВт; время нагрева $t=10$ сут.

По пространственному распределению объемной плотности энергии электромагнитного поля можно судить о направленности и глубине проникновения излучения в пласт, то есть, по сути, это распределение характеризует диаграмму направленности излучения антенны. На рис. 3 (1 и 3 — кровля и подошва нефтяного пласта 2; 4 — источник излучения) приведена изолиния объемной плотности энергии электромагнитного поля 5 для случая нагрева пласта в течение 10 суток. Изолиния 5 соответствует значению объемной плотности энергии, равному $5 \cdot 10^{-6}$ Дж/м³. Из рис. 3 видно, что диаграмма направленности излучения антенны, являясь осесимметричной, имеет сложный характер пространственного распределения электромагнитного поля, вид которого меняется с течением времени

прогрева пласта из-за температурных изменений электрофизических свойств среды. Диаграмма направленности имеет два заметно выраженных «лепестка» в вертикальной плоскости. В этих направлениях происходит наиболее глубокое проникновение излучения в пласт и окружающие породы. С уменьшением частоты излучения происходит сглаживание диаграммы направленности, и «лепестки» практически исчезают, о чем можно судить по рис. 1, на котором изображены изолинии напряженности поля частоты $f=500$ МГц. С увеличением частоты излучения «лепестки» диаграммы направленности становятся все более выраженными. Путем численного интегрирования объемной плотности энергии были получены значения энергии электромагнитного поля в пласте и окружающих породах. Сравнение этих значений показало, что приблизительно 94% этой энергии приходится на пласт и лишь 6% на окружающие породы, что свидетельствует о достаточной эффективности направленного действия используемой антенны.

В процессе нагрева пласта электромагнитным излучением размер прогретой зоны определяется глубиной проникновения некоторой фиксированной изотермы. На рис. 4 показаны изотермы температурного поля через 90 суток после начала прогрева пласта. Небольшая несимметричность относительно

плоскости изотерм $z=0$, проходящих вблизи источника излучения, связана с особенностями диаграммы направленности излучения антенны. С удалением от источника эта несимметричность сглаживается. Изотерма, соответствующая температуре $T=294$ К (отличается от начальной температуры пласта на 1 К), проникает в пласт на глубину около 10 метров. Однако размер прогретой зоны, как правило, связывают с глубиной проникновения изотермы, соответствующей процессу плавления парафина в нефти (в рассматриваемом случае — это 323 К (кривая 5).

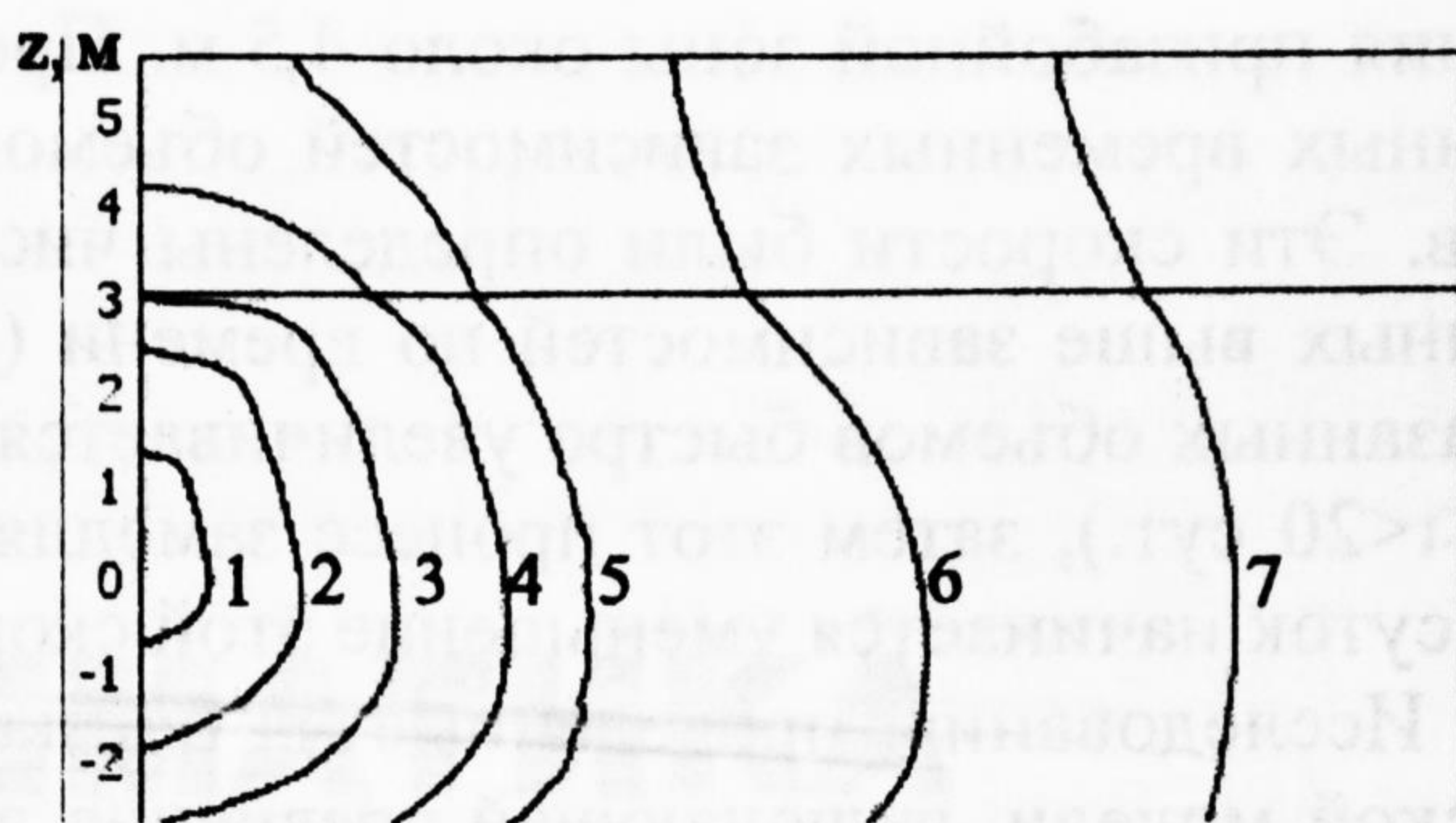


Рис. 4. Изотермы температурного поля через 90 суток после начала прогрева пласта (мощность источника $W=20$ кВт; частота излучения $f=1$ ГГц): 1 — $T=500$ К; 2 — $T=450$ К; 3 — $T=400$ К; 4 — $T=350$ К; 5 — $T=323$ К (изотерма фазового перехода); 6 — $T=300$ К; 7 — $T=294$ К

Как уже отмечалось, особенность теплоемкости среды c , возникающая при фазовом переходе, описывается с помощью дельтаобразной функции — «ступеньки» конечной ширины $2\Delta T_s$ (5). Расчеты, проведенные при варьировании ширины «ступеньки» ΔT_s в пределах от 0,01 до 0,1 К, показали независимость результатов от значения этой величины в указанных пределах. В данной модели значение ΔT_s было принято равным 0,05 К, то есть считалось, что фазовый переход происходит в диапазоне температур от 322,95 (начало процесса плавления) до 323,05 К.

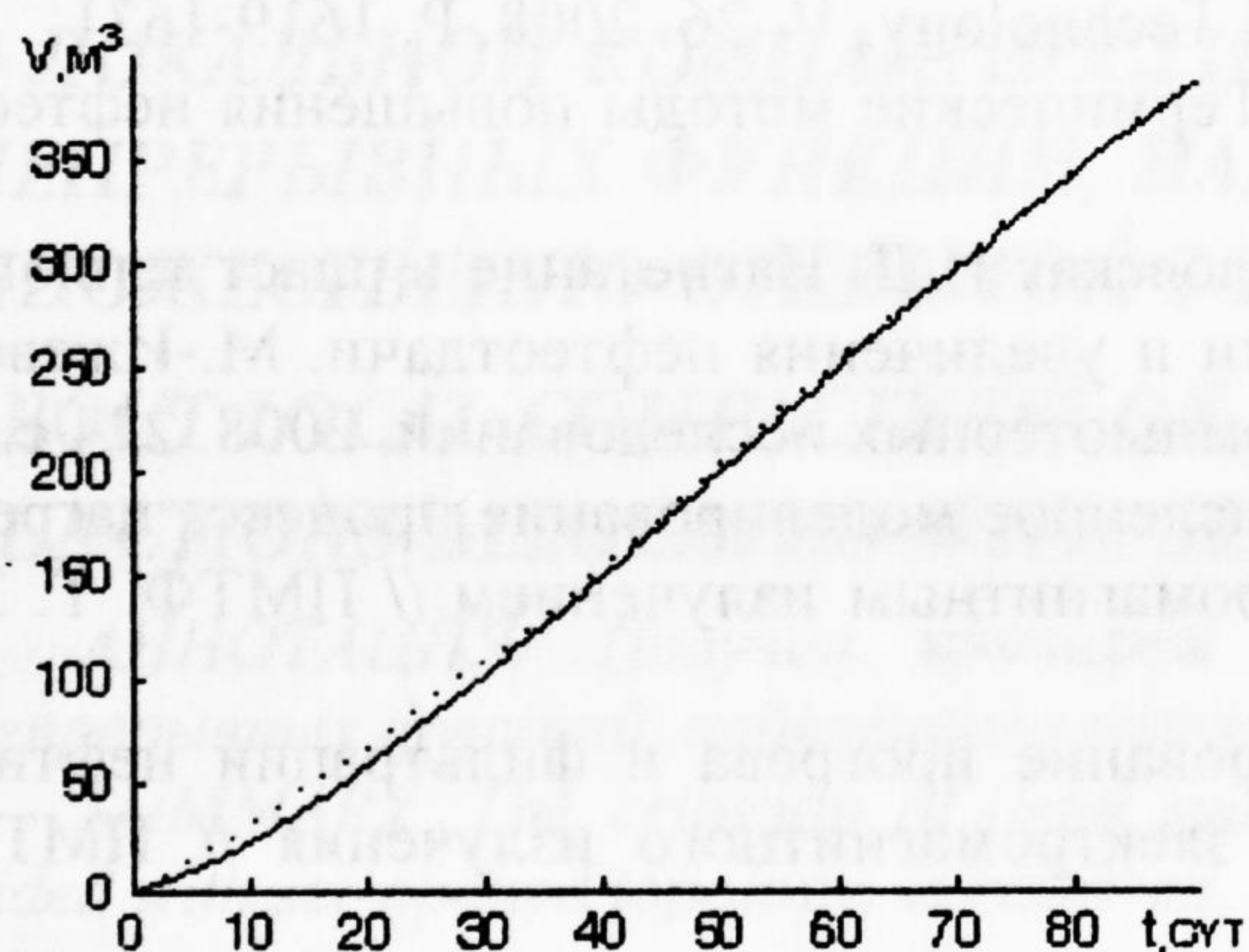


Рис. 5. Зависимости объемов расплавленной зоны (кривая 1) и области, соответствующей началу процесса плавления парафина в нефти (кривая 2) от времени нагрева пласта (мощность источника $W=20$ кВт, частота излучения $f=1$ ГГц)

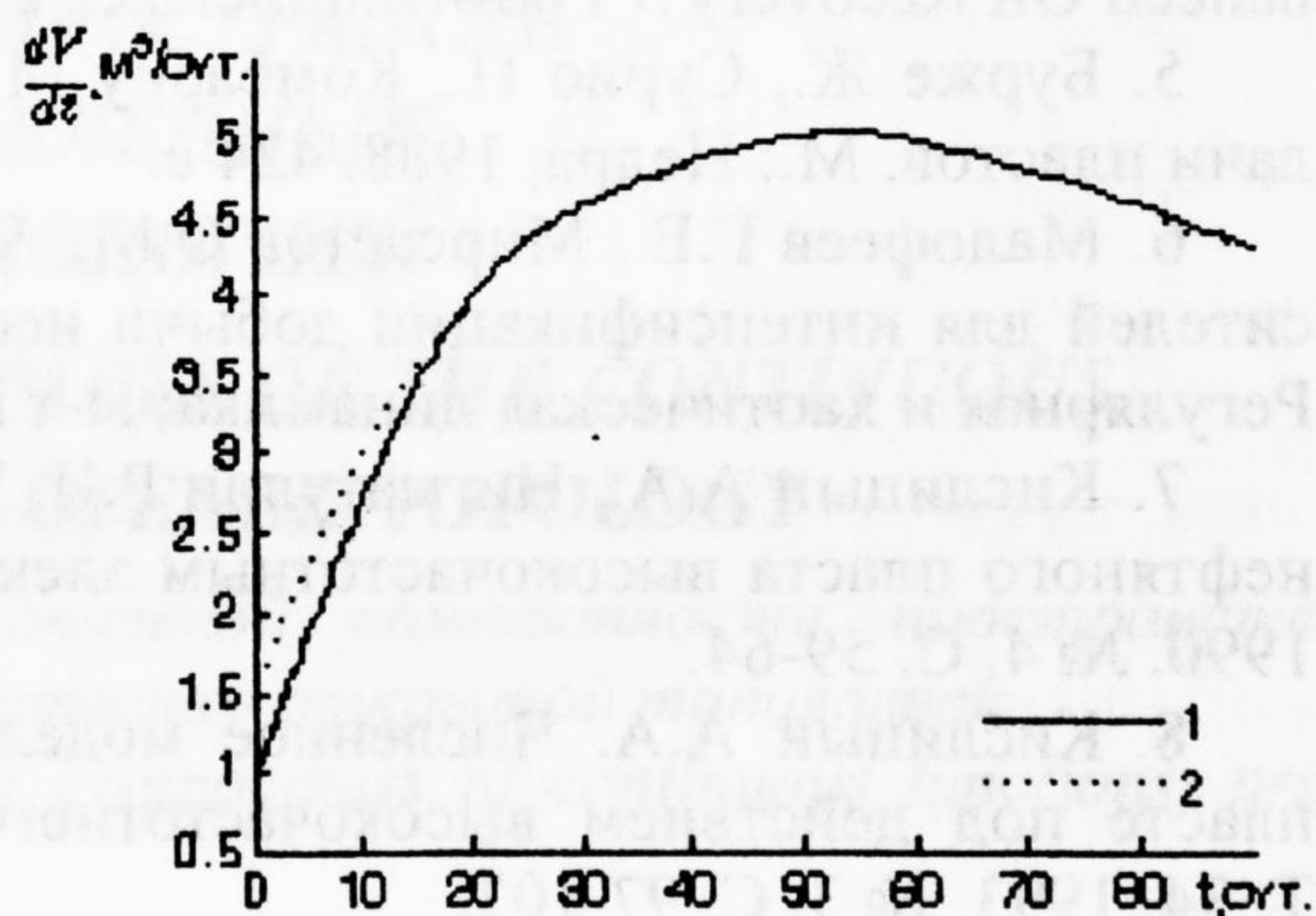


Рис. 6. Скорости роста объемов расплавленной зоны (кривая 1) и области, соответствующей началу процесса плавления парафина в нефти (кривая 2) от времени нагрева пласта (мощность источника $W=20$ кВт, частота излучения $f=1$ ГГц)

На рис. 5 приведены зависимости объемов расплавленной зоны и области, соответствующей началу процесса плавления парафина в нефти, от времени нагрева пласта источником излучения частотой $f=1$ ГГц и мощностью $W=20$ кВт. Видно, что величина объема расплавленной зоны за время нагрева 90 суток составляет приблизительно 390 м^3 , что соответствует радиусу проплав-

ления призабойной зоны около 4,5 м. Представляется интересным из приведенных временных зависимостей объемов найти скорости роста этих объемов. Эти скорости были определены численным дифференцированием указанных выше зависимостей по времени (рис. 6). Видно, что скорость роста указанных объемов быстро увеличивается на начальном этапе нагрева пласта ($0 < t < 20$ сут.), затем этот процесс замедляется, и при времени нагрева около 50 суток начинается уменьшение этой скорости.

Исследования, проведенные на близкой к реальным условиям математической модели, включающей уравнение для электромагнитного поля и уравнение теплопроводности с учетом объемного тепловыделения и фазовых переходов, позволили получить важную информацию о процессах тепломассопереноса в многофазных средах, характерных для нефтегазовой технологии, при воздействии на эти среды СВЧ-излучением. Показано, что при удачном выборе конструкции излучателя можно достичь достаточно высокой эффективности направленного действия антенны, когда 94% энергии излучения поглощается внутри пласта, и лишь 6% — в окружающих породах. Определена скорость роста объема прогреваемой зоны и наиболее эффективное время прогрева пласта, которое составляет 50-60 суток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саяхов Ф.Л., Бабалян Г.А., Чистяков С.И. О высокочастотном нагреве призабойной зоны скважин // Нефтяное хозяйство. 1970. № 10. С. 49-52.
2. Саяхов Ф.Л., Багаутдинов Н.Я. Электротепловые методы воздействия на гидратопарафиновые отложения. М.: Недра-Бизнес-центр, 2003. 119 с.
3. Vermeulen, F., McGee, B. In situ electromagnetic heating for hydrocarbon recovery and environmental remediation // J. Can. Pet. Technol. V. 39. 2000. P. 25-29.
4. Chhetri, A.B., Islam, M.R. A Critical Review of Electromagnetic Heating for Enhanced Oil Recovery // Petroleum Science and Technology. V. 26. 2008. P. 1619-1631.
5. Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1988. 424 с.
6. Малофеев Г.Е., Мирсаетов О.М., Чоловская И.Д. Нагнетание в пласт теплоносителей для интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи. М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика; И-т компьютерных исследований. 2008. 224 с.
7. Кислицын А.А., Нигматулин Р.И. Численное моделирование процесса нагрева нефтяного пласта высокочастотным электромагнитным излучением // ПМТФ. Т. 31. 1990. № 4. С. 59-64.
8. Кислицын А.А. Численное моделирование прогрева и фильтрации нефти в пласте под действием высокочастотного электромагнитного излучения // ПМТФ. Т. 34. 1993. № 3. С. 97-103.
9. Кислицын А.А., Фадеев А.М. Диэлектрическая релаксация в высоковязких нефтях // Журнал физической химии. Т. 68. 1994. № 2. С. 340-343.
10. Кислицын А.А. Тепломассоперенос в многофазных системах под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения: Дис. ... д. ф.-м. н. Тюмень, 1997.
11. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: КД «ЛИБРОКОМ», 2009. 782 с.
12. Zimmerman, W. B. J. Multiphysics Modelling with Finite Element Methods. Singapore: World Scientific. 2006. 422 p.
13. Митчелл Э., Уэйт Р. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. М.: Мир, 1981. 216 с.
14. Havriliak, S., Negami, S. A Complex Plane Analysis of α -Dispersions in Some Polymer Systems // J. Polymer Sci. Part C. 1968. № 14. P. 99-117.