

Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS

11⁽¹³⁷⁾ 2009
ноябрь



ООО «НПК «ЛУЧ»

Россия, 143930, Московская область,
г. Балашиха, мкр. Салтыковка, ш. Ильича, д. 1
Тел./факс: (495) 22-99-600 (многоканальный)
Тел.: (495) 961-0903
E-mail: luch@luch.ru <http://www.luch.ru>
Интернет-магазин: <http://www.td-luch.ru>

ДЕФЕКТОСКОП УЛЬТРАЗВУКОВОЙ
ПЕЛЕНГ™ - 115

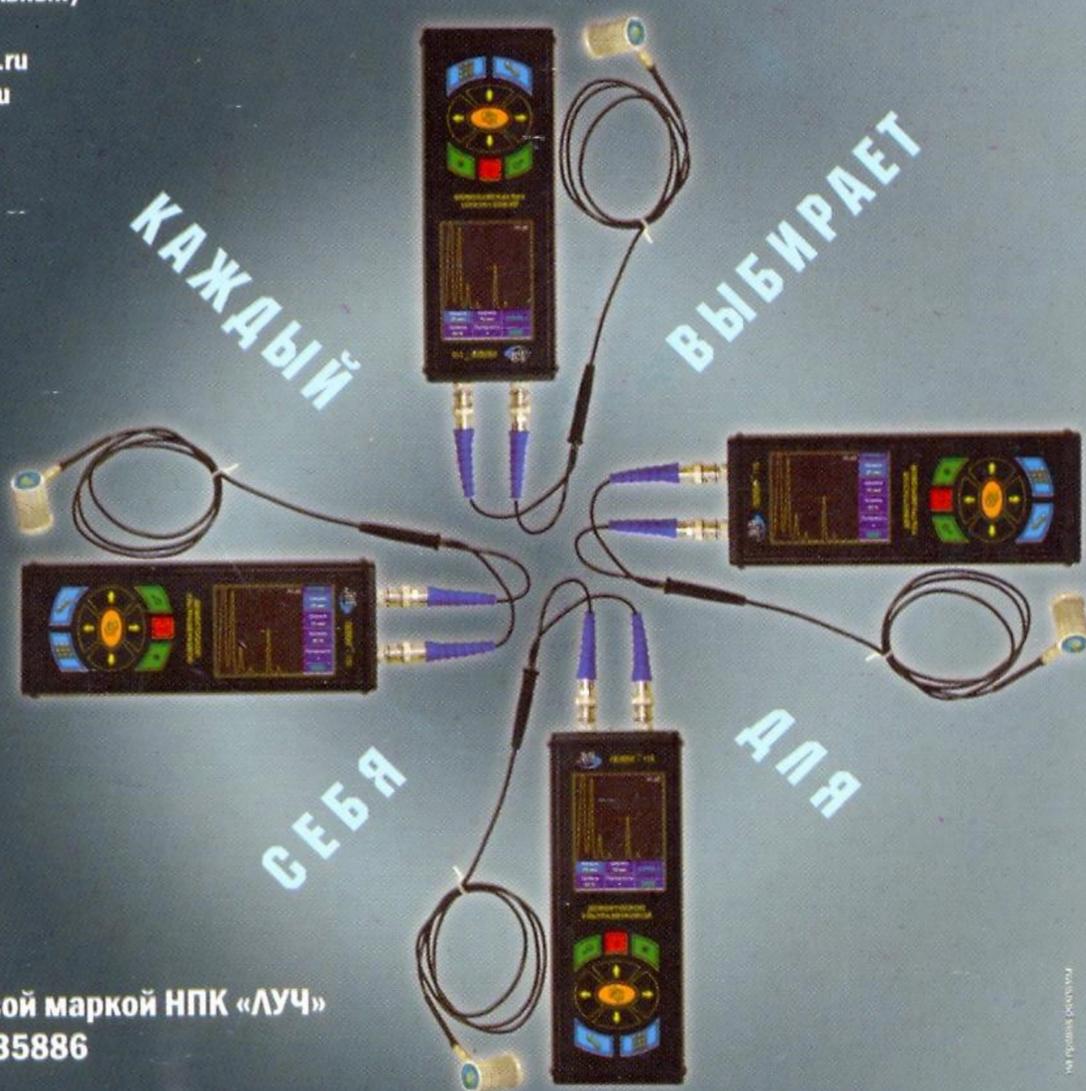
99 999 руб.

СУПЕР ЦЕНА!



для левшей и правшей

ПЕЛЕНГ™ является зарегистрированной торговой маркой НПК «ЛУЧ»
Поворот изображения защищен патентом РФ №35886





Главный редактор

В.В. Ключев – проф., акад. РАН

Заместители главного редактора:

В.Г. Шевалдыкин – д-р техн. наук

П.Е. Клейзер

Редакционный совет:

Б.В. Артемьев

Н.Р. Кузелев

В.Т. Бобров

В.И. Матвеев

О.Н. Будадин

Г.А. Нуждин

В.П. Вавилов

К.В. Подмастерьев

В.А. Голенков

А.В. Полупан

Э.С. Горкунов

Ю.С. Степанов

И.Н. Жесткова

Л.Н. Степанова

Г.В. Зусман

В.В. Сухоруков

В.В. Коннов

В.М. Труханов

Н.Н. Коновалов

Ю.К. Федосенко

Н.В. Коршакова

М.В. Филинов

В.Н. Костюков

Г.С. Шелихов

Ответственные за подготовку
и выпуск номера:

П.Е. Клейзер

Д.А. Елисеев

С.В. Сидоренко

А.Г. Ганженко

Журнал входит в перечень изданий,
утвержденных ВАК РФ для публикации
трудов соискателей ученых степеней.
При перепечатке материалов ссылка на
журнал "Контроль. Диагностика"
обязательна.

За содержание рекламных материалов
ответственность несет рекламодатель.

Журнал зарегистрирован в Федеральной
службе по надзору в сфере массовых
коммуникаций, связи и охраны культур-
ного наследия Российской Федерации.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-32268

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в издатель-
стве или в любом почтовом отделении.
Индексы по каталогам агентств:

"Роспечать" – 47649;

"Пресса России" – 29075;

"Почта России" – 60260.

Тел.: (499) 268 36 54; 268 69 19;

(495) 514 76 50

Факс: (499) 269 48 97; 268 85 26

Http://www.mashin.ru

E-mail:td@mashin.ru, kdpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

● Информация

- Бакунов А.С., Валавичюс В.М.** III Международная конференция
"Неразрушающий контроль и диагностика-2009"
(28 – 29 мая 2009 г., Вильнюс, Литва) 5

● Контроль, диагностика за рубежом

- Ланге Ю.В.** По страницам иностранных журналов 8

● Теория, методы, приборы, технологии

- Полупан А.В., Словцов С.В.** Зависимость диагностических
параметров ультразвукового контроля от характеристик металлов
при испытаниях на термическую усталость 11

- Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л., Воробьев М.А.**
Численное моделирование процесса магнитного контроля
качества прямошовных электросварных труб при циркулярном
и полюсном видах их намагничивания 18

- Баталов С.А.** Акустическая система технической диагностики
параметров эксплуатируемого нефтегазового месторождения 27

- Трубицин А.В., Телегин О.М., Тэттер В.Ю.** Автоматизация
диагностирования с помощью беспроводных измерительных модулей . . . 33

- Петухов И.В.** Оценка лабильности нервной системы
человека-оператора 37

- Хоруженко О.В.** Функционально-кодовый контроль ошибок
в устройствах хранения и передачи информации 41

- Асадов Х.Г., Абдуллаев Н.А., Магеррамов И.Ш.** О возможности
раздельного измерения концентрации поверхностного озона
и фоновое кислорода 43

- Кузьмин Н.Н., Ильин В.В.** Применение метода Байеса
в алгоритме оперативной диагностики объектов военной техники
после пулеосколочных воздействий 46

- Петрешин Д.И.** Применение лазерного оптического датчика
для измерения высотных параметров шероховатости
поверхности деталей машин в самообучающейся адаптивной
технологической системе 53

- Гусев Г.А., Локтионов Д.А.** Диагностирование электромагнитных
форсунок бензиновых двигателей с распределенными системами
впрыска 58

- Францев М.Э.** Способ оценки технического состояния корпуса
судна из композитов в процессе эксплуатации 61



Testing. Diagnostics

Journal of Russian Society for Non-Destructive Testing
and Technical Diagnostics

№ 11 (137) November 2009

CONTENTS

Information

Bakunov A.S., Valavichus V.M. The 3rd International Conference
"Non-Destructive Testing and Diagnosis" (May, 28 – 29, 2009,
Vilnius, Lithuania) 5

Testing, diagnostics abroad

Lange Yu.V. Foreign Issues Review 8

The theory, methods, devices, technology

Polupan A.V., Slovtsov S.V. Dependency "Ultrasonic Testing
Diagnostic Parameters – Metal Characteristics" in Thermal
Fatigue Testing 11

Halchenko V.Ya., Ostapuschenko D.L., Vorobyov M.A.
Numerical Simulation of Magnetic Testing of Electric-Welded
Straight Seam Pipes Provided Circular and Pole Magnetization 18

Batalov S.A. System of Technical Diagnostics for Parameters
of Operated Oil and Gas Field 27

Trubitsin A.V., Telegin O.M., Tetter V.Yu. Automation of Diagnosing
by Means of Wireless Measuring Modules 33

Petukhov I.V. Estimation of the Operator Nervous System Liability 37

Horuzhenko O.V. Functional Code Check of Errors in Information
Storage and Transfer Devices 41

Asadov H.G., Abdullaev N.A., Magerramov I.Sh. On the Possibility
of Separate Concentration Measurements of Ground Ozone
and Background Oxygen 43

Kuzmin N.N., Ilin V.V. Application of the Bayesian Algorithm
for Rapid Diagnosis of Military Equipment after the Gunshot
and Shrapnel Effects 46

Petreshin D.I. Application of a Laser Optical Sensor Control
for Measurement of High-Altitude Parameters of Machines Details
Surface Roughness in Self-Learning Adaptive Technological System 53

Gusev G.A., Loktionov D.A. Fault Diagnosis of Multipoint
Injector Solenoid 58

Frantsev M.E. The Estimation Mode of the Fiberglass Boat
Hull Technical Condition in Exploitation 61



Editor-in-chief
V.V. Klyuev, prof.

Editorial assistants:
V.G. Shevaldykin
P.E. Kleyzer

Editorial Board:

B.V. Artemyev	N.R. Kuzelev
V.T. Bobrov	V.I. Matveev
O.N. Budadin	G.A. Nuzhdin
V.P. Vavilov	K.V. Podmasteryev
V.A. Golenkov	A.V. Polupan
E.S. Gorkunov	Yu.S. Stepanov
I.N. Zhestkova	L.N. Stepanova
G.V. Zusman	V.V. Sukhorukov
V.V. Konnov	V.M. Trukhanov
N.N. Konovalov	Yu.K. Fedosenko
N.V. Korshakova	M.V. Filinov
V.N. Kostukov	G.S. Shelikhov

This issue is prepared with assistance of
P.E. Kleyzer
D.A. Eliseev
S.V. Sidorenko
A.G. Ganzenko

Journal is registered in Federal service for
supervision in the region of mass medium,
communication and protection
of cultural heritage of Russian Federation.
The registration certificate
ПИ № ФС77-32268

Journal is distributed on subscription
for which please apply to any post office.
The Catalogue indices are
47649 in the "Rospechat" Catalogue;
29075 in the Joint Catalogue "Pressa Rossii";
60260 in the "Pochta Rossii" Catalogue.

You may send your subscription order
to the Sales Dept. of the Publishing House

Tel.: (499) 268 36 54; 268 69 19;
(495) 514 76 50
Fax: (499) 269 48 97; 268 85 26

Http://www.mashin.ru
E-mail:td@mashin.ru,
kdpost@rambler.ru

MASHINOSTROENIE Publishers

Выводы

1. Применение ультразвуковых поверхностных волн позволяет эффективно неразрушающими методами оценивать термоусталостную поврежденность материала и получать значения диагностических параметров для выявления зависимостей термостойкости. Реализованный подход может использоваться для обоснования определяющего комплексного показателя термостойкости материала.

2. Результаты экспериментальных исследований показали, что для оценивания термостойкости материалов следует рекомендовать в первую очередь

показатели $\sigma_{в}$, $\sigma_{0,2}$, ρ , λ , c , $\frac{\sigma_{в}}{\alpha E}$, $\frac{\lambda}{c\rho}$, $\frac{\sigma_{в}}{\alpha E} \frac{c\rho}{\lambda}$.

3. Для подтверждения и уточнения полученных зависимостей необходимо продолжать накопление статистических данных, расширяя номенклатуру исследуемых материалов и увеличивая тем самым объем выборки n . Не исключено, что для оценивания термостойкости металлов можно будет реко-

мендовать не только показатели свойств, имеющих явную физическую интерпретацию, но и другие многопараметрические показатели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гохфельд Д.А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен. М.: Машиностроение, 1970. 259 с.
2. Полупан А.В. Диагностирование технических объектов. М.: Машиностроение-1, 2006. 294 с.
3. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2005. 400 с.
4. Судаков А.В., Слобцов С.В., Полупан А.В. Исследование динамики развития трещин термической усталости // Контроль. Диагностика. 2008. № 6. С. 6–16.
5. Судаков А.В., Слобцов С.В. Ресурс элементов энергетического оборудования при напряжениях, вызванных пульсациями температур // Методы повышения технического уровня и надежности элементов энергооборудования ТЭС и АЭС: сб. научн. тр.: Труды ЦКТИ: вып. 293. СПб.: Астерион, 2004. С. 147–157.
6. Туляков Г.А. Термическая усталость в теплоэнергетике. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.

УДК 620.179.14

В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапушенко, М.А. Воробьев

(Луганский государственный медицинский университет, Украина)

E-mail: halchvl@gmail.com

Численное моделирование операций циркулярного и полюсного намагничивания прямошовных электросварных труб при их магнитной дефектоскопии

Рассматриваются вопросы моделирования операций намагничивания при неразрушающем контроле прямошовных электросварных труб магнитным методом. При этом решение трехмерной прямой задачи магнитостатики выполняется с использованием программного обеспечения, разработанного авторами и позволяющего при расчете учесть реальную геометрическую форму объекта контроля с дефектом, сложную конфигурацию намагничивающего поля и нелинейные свойства материала. Приводятся примеры решения задач, которые ранее не решались. Обсуждается возможность использования данного программного обеспечения в целях выбора вида, способа и режимов намагничивания конкретного объекта контроля.

In the article a simulation of magnetic testing of electric-welded straight seam pipes is considered. 3D magnetostatics problem is solved using software developed by authors. The software takes into account an actual geometrical shape of test object with crack, a magnetization field configuration and non-linear material properties. Solutions of problems that were not solved earlier are present in the article. The software use for choosing of kind, way and mode of magnetization of test object is discussed.

Ключевые слова: объект контроля, циркулярное и полюсное намагничивание, поле рассеяния дефекта, непровар, смещение кромок.

Key words: magnetic testing, circular and pole magnetization, field of crack, numerical simulation.

При неразрушающем контроле магнитным методом (НКММ) одним из основных этапов его проведения является операция намагничивания объек-

тов контроля. Конфигурация намагничивающего поля оказывает существенное влияние на магнитное состояние вещества в различных точках объек-



та контроля, а следовательно, предопределяет структуру информационного магнитного поля в зоне контроля и при наличии дефекта. Во время контроля необходимо обеспечить такие условия намагничивания, при которых конфигурация информационного магнитного поля в зоне контроля при наличии дефекта будет заметно отличаться от конфигурации поля соответствующего бездефектного участка изделия. Иными словами, информационное магнитное поле вблизи дефекта должно нести ярко выраженные характерные признаки его наличия. Этим фактом в конечном итоге определяется достоверность выявления дефектов, а следовательно, эффективность контроля в целом. Низкая информативность самого поля, слабая выраженность признаков, позволяющих судить о наличии или отсутствии дефекта, естественно, не могут быть компенсированы применением даже самых совершенных средств регистрации. Поэтому для обеспечения высокой эффективности устройств контроля еще на этапе проектирования следует правильно выбрать вид и способ намагничивания конкретного объекта, а также обеспечить возможность подбора эффективных режимов работы магнитной системы. При этом под выбором режима будем понимать выбор значений рабочих параметров устройства намагничивания, когда сама конструкция его магнитной системы остается неизменной, например токов в соленоидах или расстояний между магнитными полюсами электромагнитов в случае, когда такое их изменение предусмотрено конструкцией.

Для надежного обнаружения средствами регистрации полей рассеяния дефектов должен выполняться ряд определенных условий. Так, например, при магнитопорошковом контроле в приложенном поле нормальная составляющая напряженности поля в зоне контроля не должна более чем втрое превышать тангенциальную, значение напряженности поля должно достигать 2...6 кА/м, а по некоторым требованиям и 10 кА/м [1]. Большое значение также имеет угол расположения дефекта относительно направления силовых линий магнитного поля. Такие условия должны быть в максимальном объеме учтены при разработке намагничивающих устройств. Их учет без существенных трудностей возможен лишь тогда, когда геометрическая форма объекта контроля достаточно проста, а поведение магнитного поля легко предсказуемо. В случае когда объект контроля имеет сложную геометрию, а при наличии дефектов произвольной формы это

имеет место в подавляющем большинстве случаев, задача анализа конфигурации его поля становится нетривиальной. Тем более что нелинейность магнитных свойств материала существенно сказывается на конфигурации магнитного поля объекта контроля. Обычно поле от дефекта в нелинейной среде многократно превышает поле от дефекта в линейной среде при тех же самых значениях магнитной проницаемости. Однако для сложных границ раздела при определенных режимах намагничивания вместо усиления поля может наблюдаться заметное его ослабление, а его характер становится практически непредсказуемым. Это обстоятельство еще раз подчеркивает необходимость исследования режимов намагничивания в каждом конкретном случае контроля.

Важнейшим методом, позволяющим облегчить задачу проектирования устройств намагничивания для конкретных видов изделий, является математическое моделирование. При этом выбор модели определяет адекватность получаемых результатов, а ценность модели зависит от объема учитываемых факторов, влияющих на объект моделирования. Анализ показал, что существующие модели намагничивания труб с дефектами при НКММ [2–4] имеют достаточно большую степень идеализации. Так, например, аналитическая модель, приведенная в [4] и предназначенная для расчета поля бесконечно длинной продольной трещины на поверхности трубы, не позволяет учесть неоднородный характер внешнего намагничивающего поля, а также описать дефекты других типов, имеющих произвольную пространственную геометрическую конфигурацию и конечные размеры. Аналогичные трудности возникают и при использовании модели из [2], основанной на дипольном приближении. Модельные задачи, но без существенных ограничений, могут быть решены с применением разработанного авторами программного обеспечения (ПО) [5–8], предназначенного для моделирования операций намагничивания при максимально приближенных к реальности условиях контроля.

Разработанное ПО основывается на методе пространственных интегральных уравнений, который позволяет при расчете учесть произвольную форму объекта контроля, нелинейные магнитные свойства и характер намагничивающего поля. В соответствии с данным методом прямая пространственная задача магнитостатики сводится к решению нелинейного интегрального уравнения вида

$$\vec{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_Q \iiint_V \vec{M}(P) \text{grad}_P \frac{1}{r_{PQ}} dV_P + \vec{H}_0(Q), \quad (1)$$

где P и Q – соответственно точки истока и наблюдения, принадлежащие ферромагнитному объекту контроля V ; $\vec{r}_{PQ} = \vec{r}_Q - \vec{r}_P$ – вектор, направленный из точки P в точку Q ; r_{PQ} – модуль вектора \vec{r}_{PQ} ; \vec{H} – напряженность магнитного поля; \vec{M} – намагниченность ферромагнетика; \vec{H}_0 – напряженность магнитного поля, создаваемого намагничивающим устройством в виде системы проводников с током, электромагнитов или постоянных магнитов, определяемая в соответствии с математической моделью для каждого конкретного его типа. Уравнение (1) решается совместно с дополнительной зависимостью, описывающей магнитные свойства вещества

$$\vec{M} = F(\vec{H}).$$

В теории потенциала доказывается, что уравнение (1) учитывает граничные условия, характерные для задач магнитостатики. Без существенных ограничений на форму объекта контроля уравнение (1) может быть решено численно, при этом объем объекта разбивается на элементарные объемы, в пределах которых можно условно считать постоянными намагниченность и напряженность поля, тогда исходное уравнение может быть заменено его дискретным аналогом [5, 6]

$$\vec{H}_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \oint_{\partial V_j} \frac{(\vec{M}_j \vec{n}_p) \vec{r}_{PQ_j}}{r_{PQ_j}^3} dS_p + \vec{H}_{i0}, \quad i = \overline{1, N},$$

где \vec{H}_i и \vec{M}_i – напряженности магнитного поля в центрах элементарных объемов Q_i и их намагниченности, связанные уравнением магнитной характеристики $\vec{M}_i = F_i(\vec{H}_i)$; \vec{H}_{i0} – значения напряженностей намагничивающего поля в точках Q_i ; N – число элементарных объемов V_j ; ∂V_j – их границы. После решения системы нелинейных уравнений и нахождения значений \vec{M}_i поле в произвольной точке пространства Q может быть рассчитано по формуле

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \oint_{\partial V_j} \frac{(\vec{M}_j \vec{n}_p) \vec{r}_{PQ}}{r_{PQ}^3} dS_p + \vec{H}_0(Q).$$

В состав программного комплекса включено большое число моделей устройств намагничивания, позволяющих определять пространственную топографию создаваемых ими магнитных полей. Наличие широкого перечня параметризованных моделей источников поля, а также возможность их одновременного использования в различных комбинациях обеспечивают широкий диапазон варьирования конструкции намагничивающего устройства. Выполняя расчет поля конкретного объекта с потенциально возможными дефектами для различных вариантов конструкции устройства намагничивания, можно осуществить ее рациональный выбор, а также подобрать наиболее благоприятствующие выявлению дефектов режимы намагничивания.

Целью настоящей статьи является демонстрация возможностей по выбору видов, способов и режимов намагничивания объектов контроля сложной геометрической формы с использованием разработанной авторами информационной модели и технологии ее применения.

На этапе разработки описываемое ПО прошло многоуровневую верификацию, которая показала достаточно высокую точность получаемых с его помощью результатов [5–7]. Однако для того чтобы убедиться в достоверности вычислений, выполняемых с помощью ПО для объектов трубчатой формы, проведем анализ поля ферромагнитной трубы, помещенной в поперечное однородное магнитное поле напряженностью $H_0 = 6000$ А/м, численным и аналитическим методами с последующим сопоставлением полученных результатов.

Геометрическая модель участка трубы приведена на рис. 1, ее дискретная модель включает в себя 11 484 тетраэдра. Для линейного случая напряженность магнитного поля бесконечной трубы, помещенной в однородное поле, согласно [9, 10] в окружающем пространстве описывается формулами

$$\begin{aligned} H_y &= H_0 \left[1 - R^2 \frac{(\mu^2 - 1)(1 - \lambda^2)}{(\mu + 1)^2 - (\mu - 1)^2 \lambda^2} \frac{z^2 - y^2}{(z^2 + y^2)^2} \right]; \\ H_z &= H_0 R^2 \frac{(\mu^2 - 1)(1 - \lambda^2)}{(\mu + 1)^2 - (\mu - 1)^2 \lambda^2} \frac{2zy}{(z^2 + y^2)^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где R и r – наружный и внутренний радиусы трубы; $\lambda = \frac{r}{R}$; μ – относительная магнитная проницаемость материала.

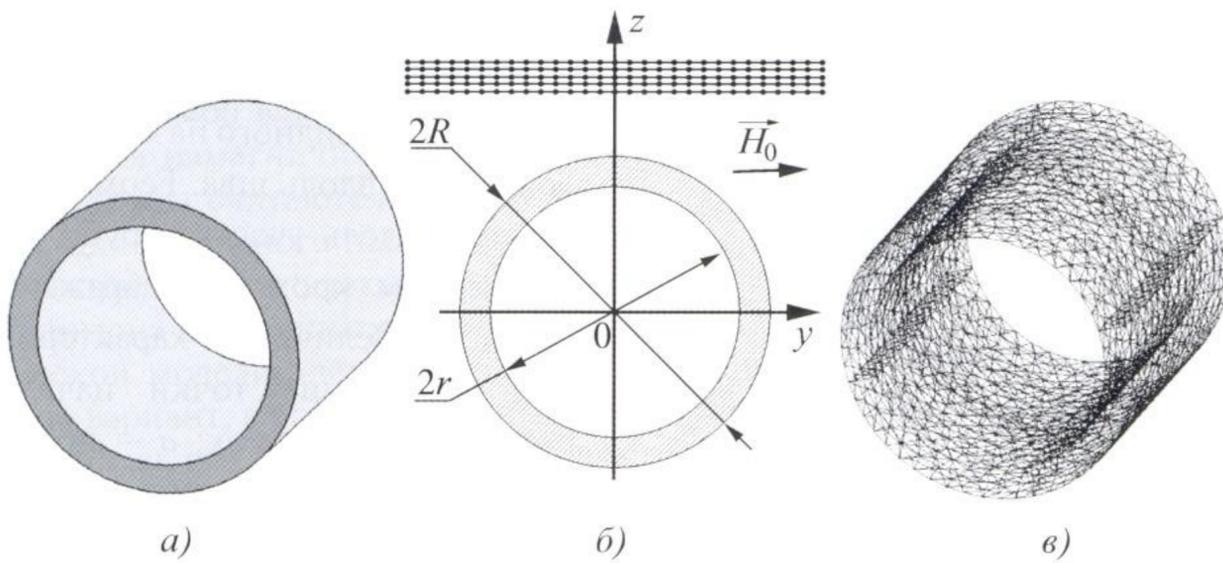


Рис. 1. Геометрическая модель участка трубы:

a – исходная геометрическая модель объекта контроля; *б* – параметры модели и схема расположения контрольных точек; *в* – дискретная геометрическая модель объекта контроля

В полости трубы поле однородно, направлено вдоль намагничивающего поля и рассчитывается по формуле

$$H_y = H_0 \frac{4\mu}{(\mu + 1)^2 - (\mu - 1)^2 \lambda^2} \quad (3)$$

Расчет проводился для участка трубы с наружным и внутренним радиусами $R = 10$ мм и $r = 8$ мм, длиной $2h = 200$ мм, что в определенном смысле можно считать приемлемым для сопоставления с аналитическим решением (2), полученным в предположении бесконечной протяженности объекта контроля. Магнитная проницаемость материала

принималась постоянной и равной $\mu = 100$. Вычисления выполняли для контрольных точек $x = 0, y = -20 \dots +20$ мм на различных высотах от поверхности трубы 1, 2, ..., 5 мм ($z = 11, 12, \dots, 15$ мм), т.е. в равномерно распределенных на пяти отрезках, каждому из которых соответствует график распределения поля. Схематически положение контрольных точек относительно объекта контроля представлено на рис. 1, б. Результаты численных расчетов для различных высот приведены на рис. 2 сплошными линиями. Точками отмечены соответствующие результаты аналитических расчетов по формулам (2). Здесь и в других примерах численных расчетов при увеличении высоты над поверхностью объекта контроля напряженность поля убывает по абсолютной величине. Результаты численных и аналитических расчетов различаются не более чем на 5 %. В полости трубы результаты численного расчета отличаются от результатов, полученных с помощью формулы (3), не более чем на 7 %. При этом наблюдалась однородность поля, которая нарушалась при приближении контрольных точек к краям участка трубы. Проведенная верификация ПО свидетельствует о достаточно высокой досто-

точности. Точками отмечены соответствующие результаты аналитических расчетов по формулам (2). Здесь и в других примерах численных расчетов при увеличении высоты над поверхностью объекта контроля напряженность поля убывает по абсолютной величине. Результаты численных и аналитических расчетов различаются не более чем на 5 %. В полости трубы результаты численного расчета отличаются от результатов, полученных с помощью формулы (3), не более чем на 7 %. При этом наблюдалась однородность поля, которая нарушалась при приближении контрольных точек к краям участка трубы. Проведенная верификация ПО свидетельствует о достаточно высокой досто-

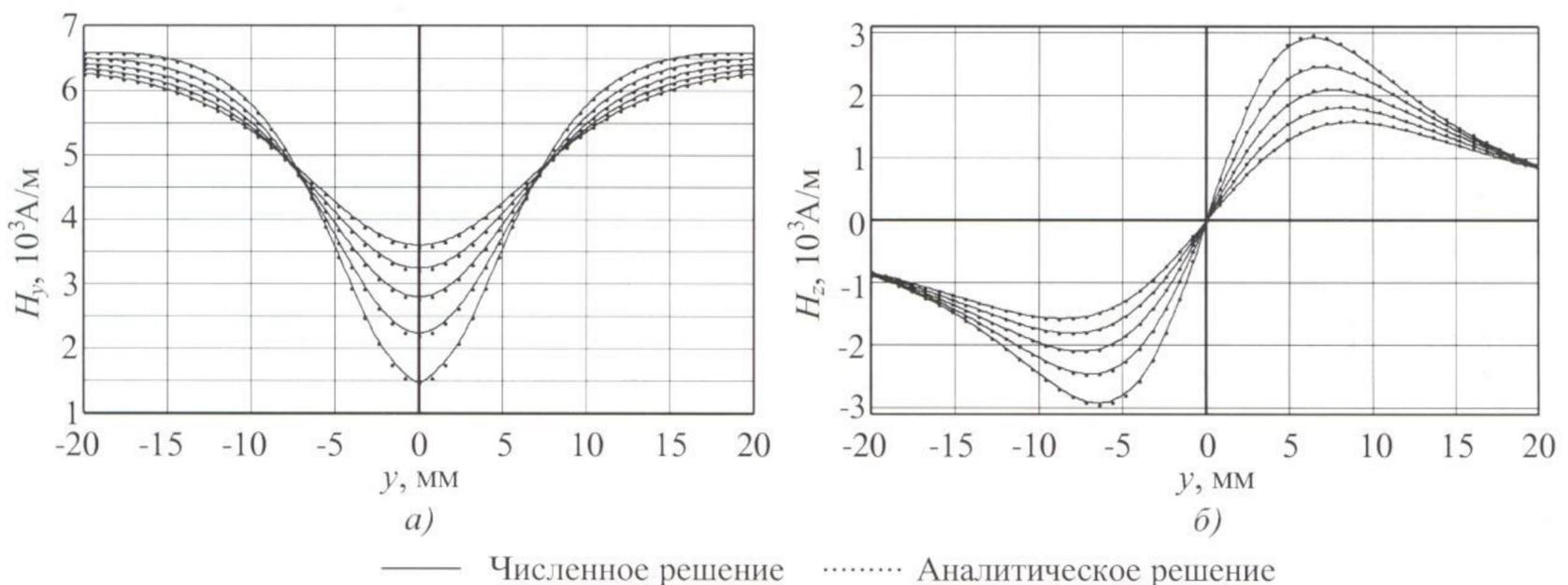


Рис. 2. Результат расчета поля трубы, намагниченной в однородном поле:

a – тангенциальная составляющая поля; *б* – нормальная составляющая поля

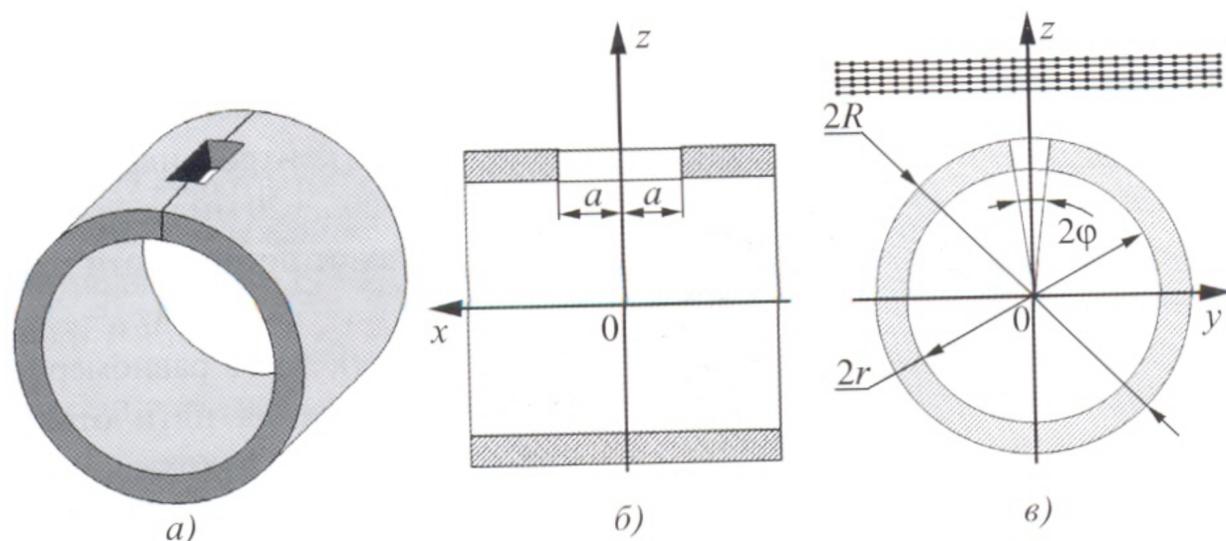


Рис. 3. Геометрическая модель трубы с дефектом типа непровара:

a — исходная геометрическая модель объекта контроля; b — параметры модели и схема расположения контрольных точек; R и r — наружный и внутренний радиусы трубы; $2a$ — длина непровара; 2φ — угол его раскрытия

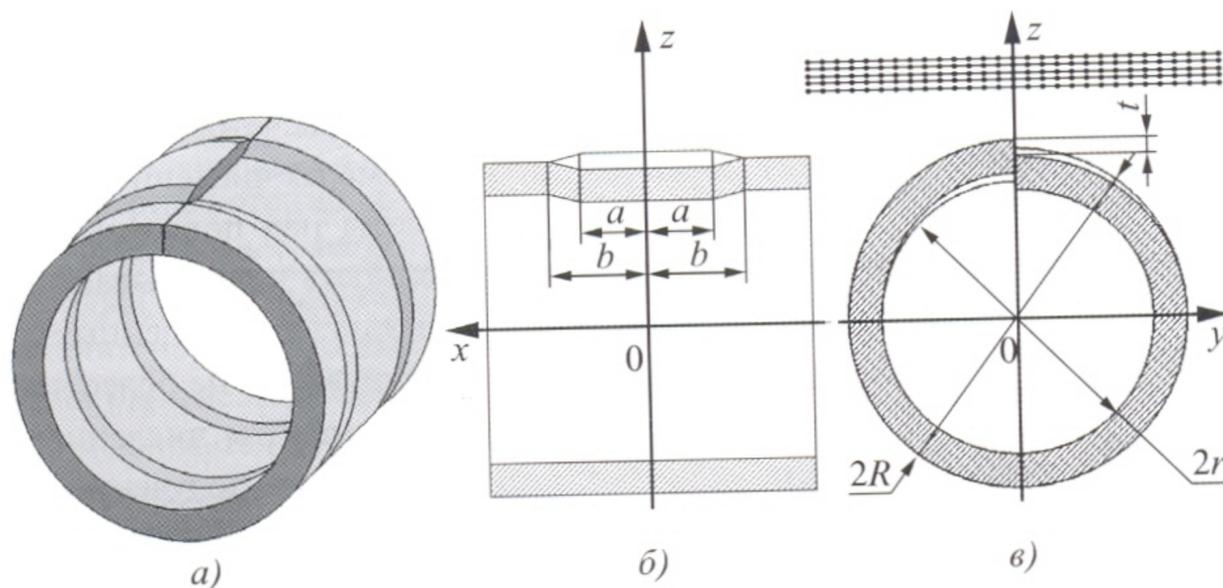


Рис. 4. Геометрическая модель трубы с дефектом типа смещения кромок:

a — исходная геометрическая модель объекта контроля; b — параметры модели и схема расположения контрольных точек

верности получаемых с его помощью результатов даже для случая, когда теоретически бесконечно длинный объект контроля описывается моделью конечной протяженности.

В качестве объекта дальнейшего исследования был выбран участок стальной электросварной прямошовной трубы ГОСТ 10704–91 с различными дефектами. Как указывается в [11], наибольшую долю дефектов в изделиях данного вида составляют непровары, смещения кромок шва, раковины. Методика расчета поля объекта контроля с раковиной ничем принципиально не отличается от примера, приведенного в [7]. Поэтому в статье основное внимание уделяется дефектам первых двух типов. Геометрические модели труб с дефектами показаны на рис. 3, 4.

На рис. 3 представлена модель трубы со сплошным непроваром в виде клиновидного паза, расположенного вдоль шва. Геометрическая модель участка трубы со смещением кромок изображена на рис. 4. Величина b характеризует положение точки начала расхождения кромок; a — положение точки окончания расхождения и начала участка, на котором кромки расположены параллельно; t — величина смещения.

Намагничивание объекта контроля осуществлялось тремя видами источников. В идеализированном случае намагничивание проводилось поперечным однородным магнитным полем, в двух других, более соответствующих реальным случаям контроля, использовалось циркулярное намагничивание продольным пропусканием электрического тока и полюсное поперечное намагничивание электромагнитом.

При циркулярном намагничивании продольным пропусканием электрического тока для простоты предполагается, что плотность тока по сечению объекта является постоянной. Тогда

для расчета конфигурации намагничивающего поля в теле трубы используется зависимость [11]

$$H = \frac{I}{2\pi\bar{r}} \frac{\bar{r}^2 - r^2}{R^2 - r^2},$$

в окружающем пространстве поле трубы совпадает с полем тонкого провода с током

$$H = \frac{I}{2\pi\bar{r}},$$

где I — ток, пропускаемый через трубу; \bar{r} — расстояние от оси до точки, в которой производится вычисление поля. Силовые линии поля представляют собой окружности, центры которых находятся на

оси трубы. Поле в полости трубы отсутствует. Предполагается, что продольно ориентированный дефект слабо влияет на протекание тока, поэтому условия намагничивания дефектной и бездефектной трубы считаются одинаковыми.

Для полюсного намагничивания зоны шва трубы применялся электромагнит, обмотка которого запитана постоянным током. В качестве математической модели электромагнита использовался такой вариант, в котором его поле приближенно описывалось полем пары следов полюсов, на которых располагался простой слой магнитных зарядов постоянной плотности σ различного знака, как это сделано, например, в [11, 12].

В локальной системе координат, связанной с полюсом, его поле определяется по формулам [11–13]:

$$H_{x'} = -\frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \ln(y_j + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z'^2});$$

$$H_{y'} = -\frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \ln(x_i + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z'^2});$$

$$H_{z'} = -\frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \times$$

$$\times \left[\arctg \left(\frac{x_i z'}{y_j \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z'^2}} \right) + \arctg \left(\frac{y_j z'}{x_i \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z'^2}} \right) \right];$$

$$x_1 = x'; \quad y_1 = y';$$

$$x_2 = x' - a; \quad y_2 = y' - b; \quad \sigma = \pm \mu_0 M.$$

Здесь предполагается, что в локальной системе координат полюс располагается в плоскости, образованной осями абсцисс и ординат; a и b – его геометрические размеры; x' , y' и z' – координаты точки в локальной системе координат, в которой определяется значение напряженности поля. Напряженность поля электромагнита представляет собой сумму напряженностей полей следов его полюсов, получаемых после соответствующего преобразования в глобальную систему координат. Схема взаимного расположения электромагнита и объекта контроля приведена на рис. 5.

Конкретизируем условия вычислительного эксперимента и приведем его результаты. Расчет проводился для участка трубы с наружным и внутренним радиусами $R = 51$ мм и $r = 47$ мм. Магнитная характеристика материала трубы, график которой показан на рис. 6, заимствована из работы [14], т.е. учитывались нелинейные свойства ферромагнетика.

Расчет поля во всех приведенных примерах выполнялся в контрольных точках, расположенных на отрезках, перпендикулярных к оси трубы $x = 0$, $y = -100 \dots +100$ мм на расстояниях от ее поверхности, равных 1, 2, ..., 5 мм ($z = 52, 53, \dots, 56$ мм). Схематически размещение контрольных точек относи-

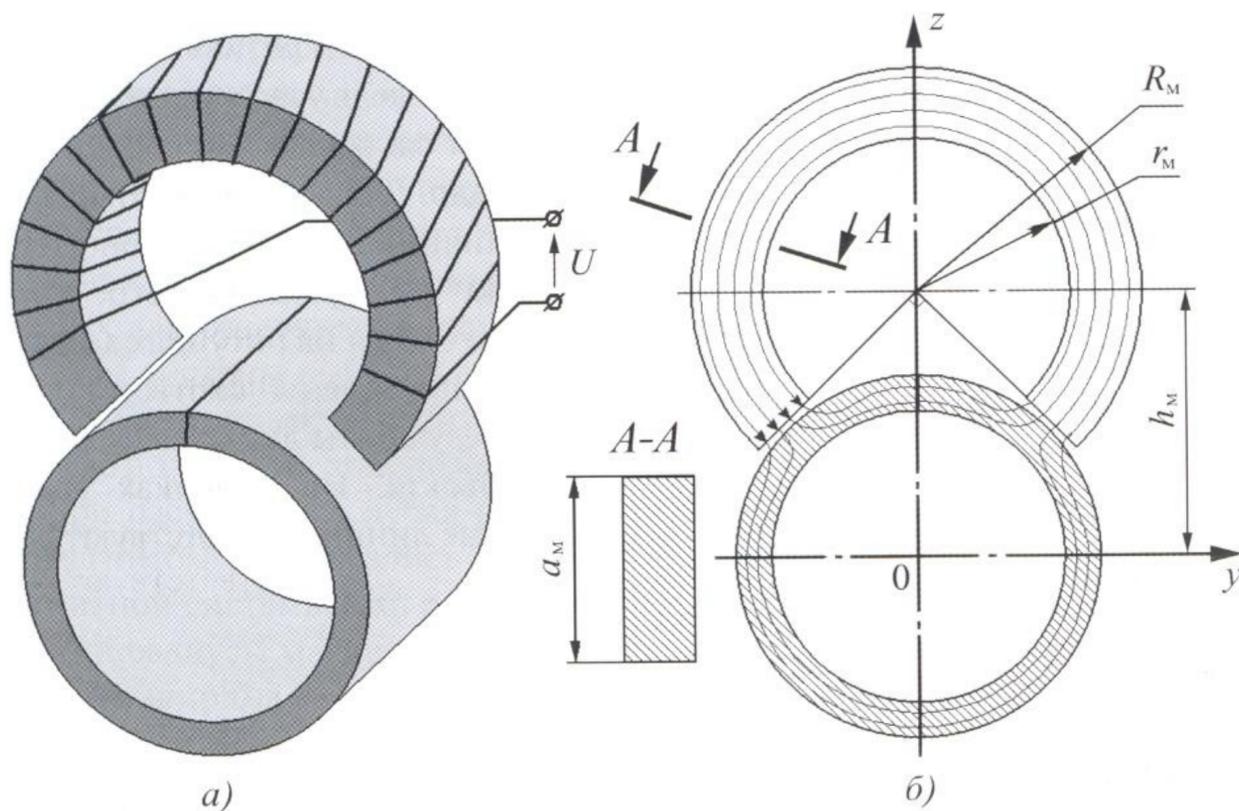


Рис. 5. Намагничивание зоны шва трубы электромагнитом:
 а – взаимное расположение намагничивающего устройства и объекта контроля;
 б – параметры модели

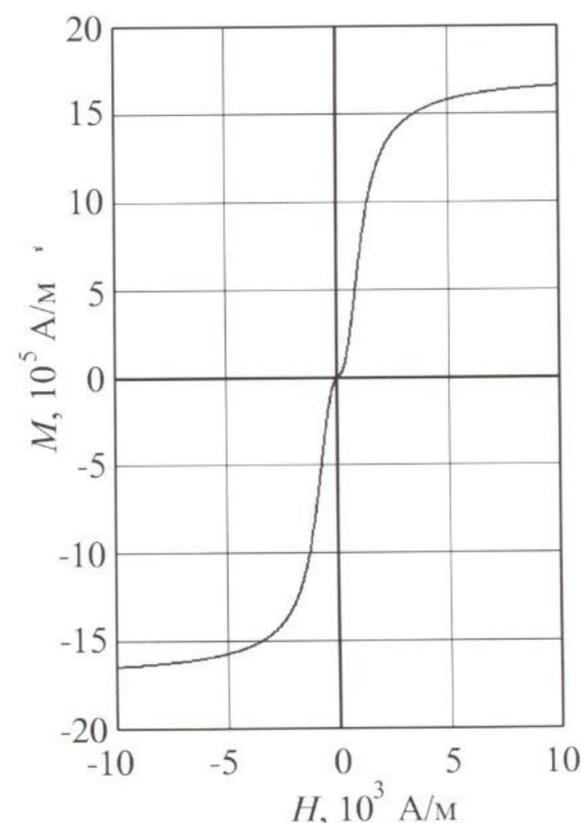


Рис. 6. Магнитная характеристика материала трубы

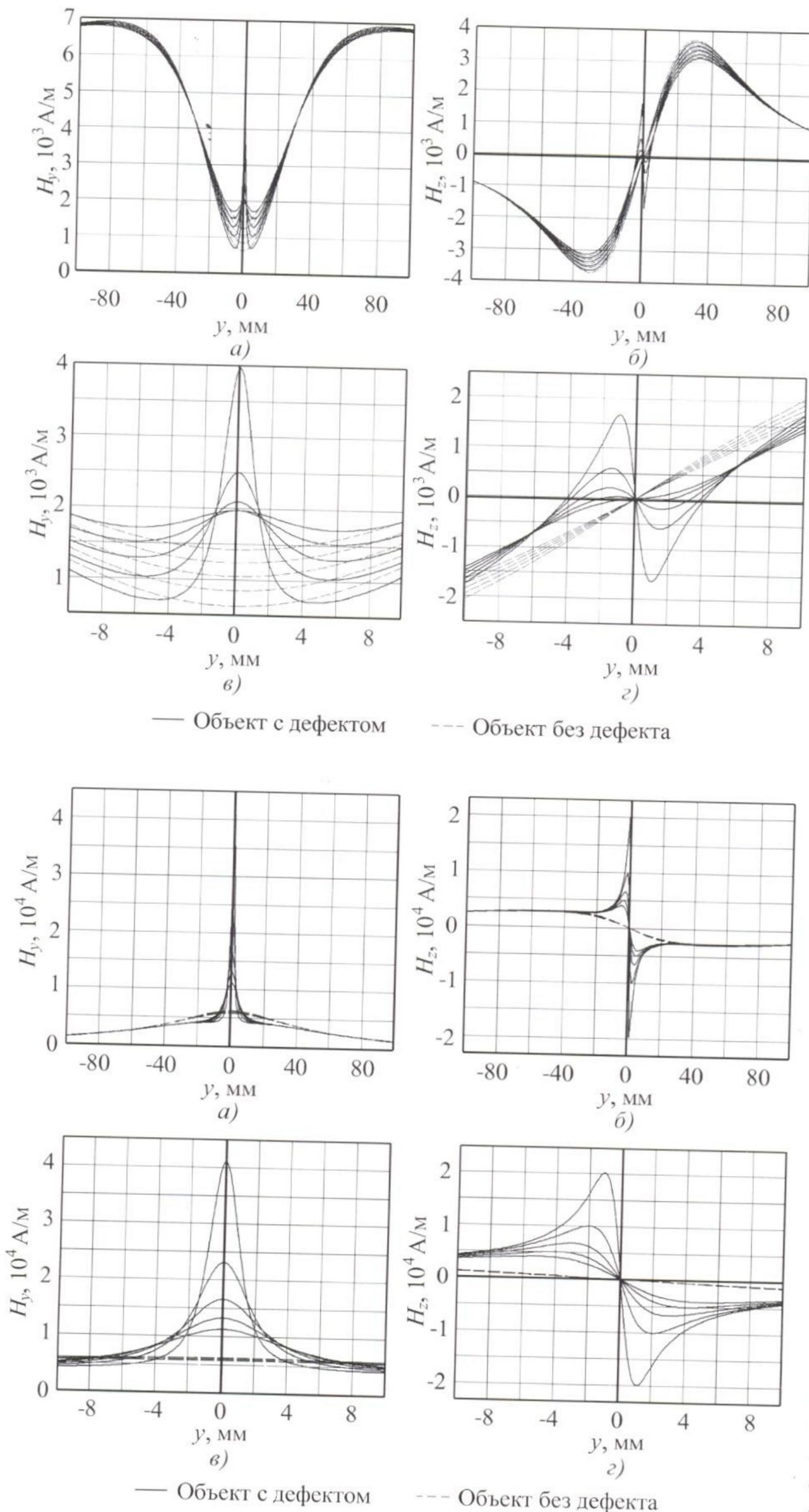


Рис. 7. Результат расчета магнитного поля трубы со сплошным непроваром при ее намагничивании поперечным однородным полем:

а – тангенциальная составляющая поля; б – нормальная составляющая поля; в – тангенциальная составляющая поля вблизи дефекта; г – нормальная составляющая поля вблизи дефекта

тельно объектов контроля изображено на рис. 3, б и 4, б. Для получения более детального представления о характере магнитного поля вблизи дефекта расчет проводился также для контрольных точек на отрезках $x = 0, y = -10...+10$ мм, расположенных на таких же расстояниях от поверхности трубы.

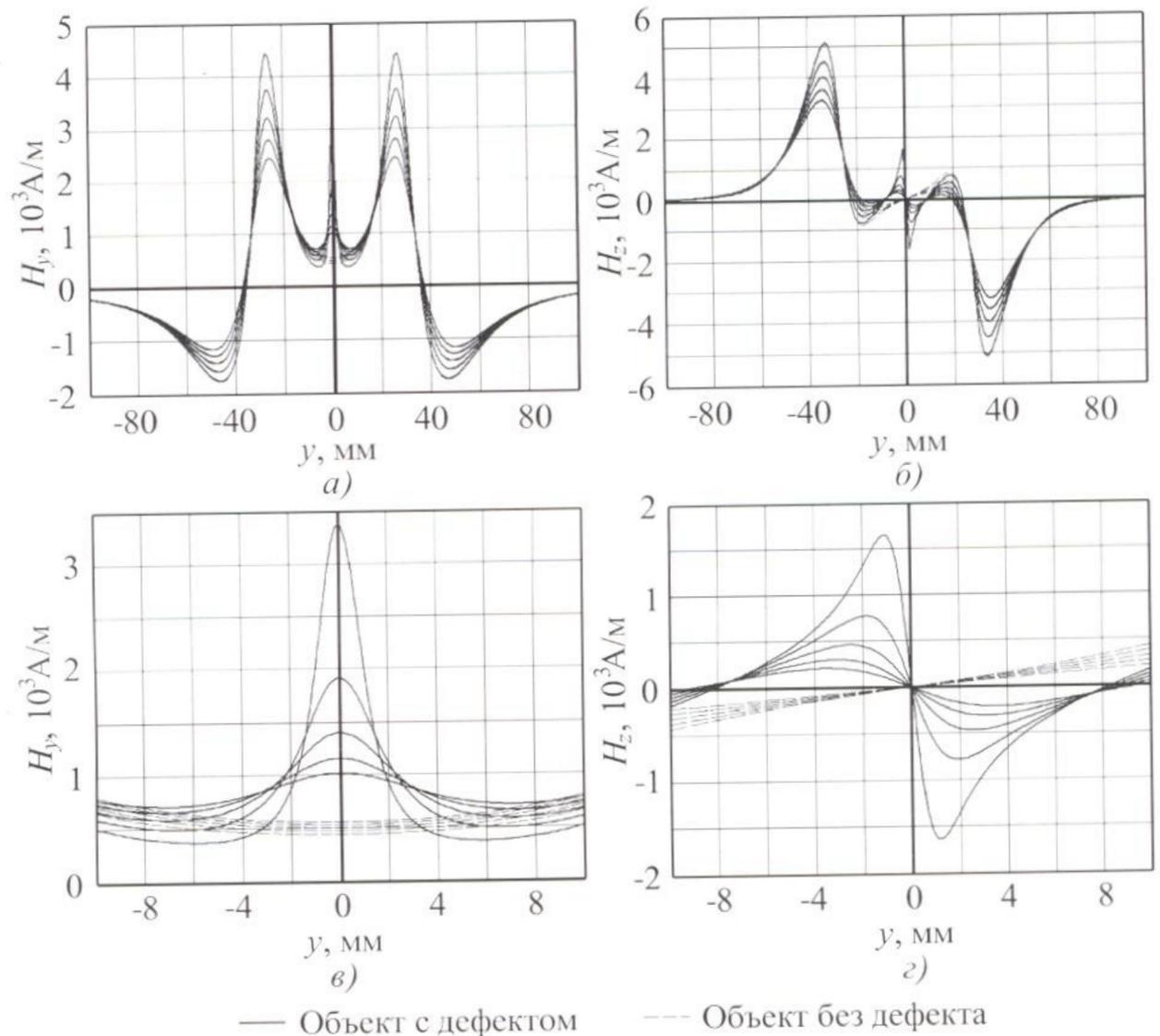
Результат расчета поля трубы со сплошным непроваром длиной $2a = 40$ мм и углом раскрытия $2\varphi = 1^\circ$ (см. рис. 3) при ее намагничивании поперечным однородным магнитным полем, равным $H_y = 6000$ А/м, приведен на рис. 7. Дискретная геометрическая модель участка трубы с дефектом включает в себя 12 121 тетраэдр. Для возможности оценки влияния дефекта на конфигурацию информационного магнитного поля на рисунках здесь и далее приведены соответствующие результаты для бездефектного объекта. На графиках утолщенные линии соответствуют ре-

Рис. 8. Результат расчета магнитного поля трубы со сплошным непроваром при ее намагничивании продольным пропусканием электрического тока:

а, б, в, г – см. рис. 7

Рис. 9. Результат расчета магнитного поля трубы со сплошным непроваром при ее намагничивании электромагнитом:

а, б, в, г — см. рис. 7



результатам расчета поля объекта с дефектом, тогда как тонкой линией изображено поведение поля бездефектного объекта при тех же условиях. При расчете объект без дефекта разбивался на 11 362 тетраэдра. На графиках отчетливо видны характерные искажения поля, вносимые дефектом.

Результаты расчета поля трубы с аналогичным дефектом при намагничивании продольным пропусканием электрического тока силой $I = 2000$ А показаны на рис. 8. Для сравнения результатов, полученных для различных видов намагничивания, параметры системы выбирались таким образом, что у поверхности объекта вблизи дефекта намагничивающее поле имело приблизительно равные значения.

При расчете для случая намагничивания электромагнитом принимались следующие параметры магнитной системы (см. рис. 5): наружный и внутренний радиусы магнитопровода $R_m = 63$ мм и $r_m = 43$ мм, ширина $a_m = 50$ мм, высота расположения центра магнитопровода электромагнита $h_m = 75$ мм, следовательно, между его полюсами и поверхностью трубы имеется зазор 2 мм. Намагниченность магнитопровода принималась равной $M = 70\,000$ А/м. Результат расчета поля приведен на рис. 9.

Рассмотрим пример расчета магнитного поля участка трубы со смещением кромок, геометрическая модель которой представлена на рис. 4. Параметры, характеризующие геометрическую модель, имели следующие значения: координаты точек начала и конца расхождения кромок $b = 25$ мм и $a = 20$ мм соответственно, величина смещения $t = 1$ мм. Объект контроля описывался дискретной моделью, содержащей 12 180 тетраэдров. Как для случая намагничивания однородным внешним полем (рис. 10), так и для случая намагничивания пропусканием продольного электрического тока (рис. 11) смещение кромок характеризуется двупольным скачком нормальной и тангенциальной составляющих напряженности поля, который отличает данный дефект от непровара.

Таким образом, в результате выполнения серии вычислительных экспериментов появляется возможность проведения сравнительного анализа различных видов и способов намагничивания объекта контроля с потенциально наиболее опасным типом дефекта без существенных ограничений на его размеры, форму и местоположение, а следовательно, достигаются наиболее благоприятные условия для выявления дефекта.

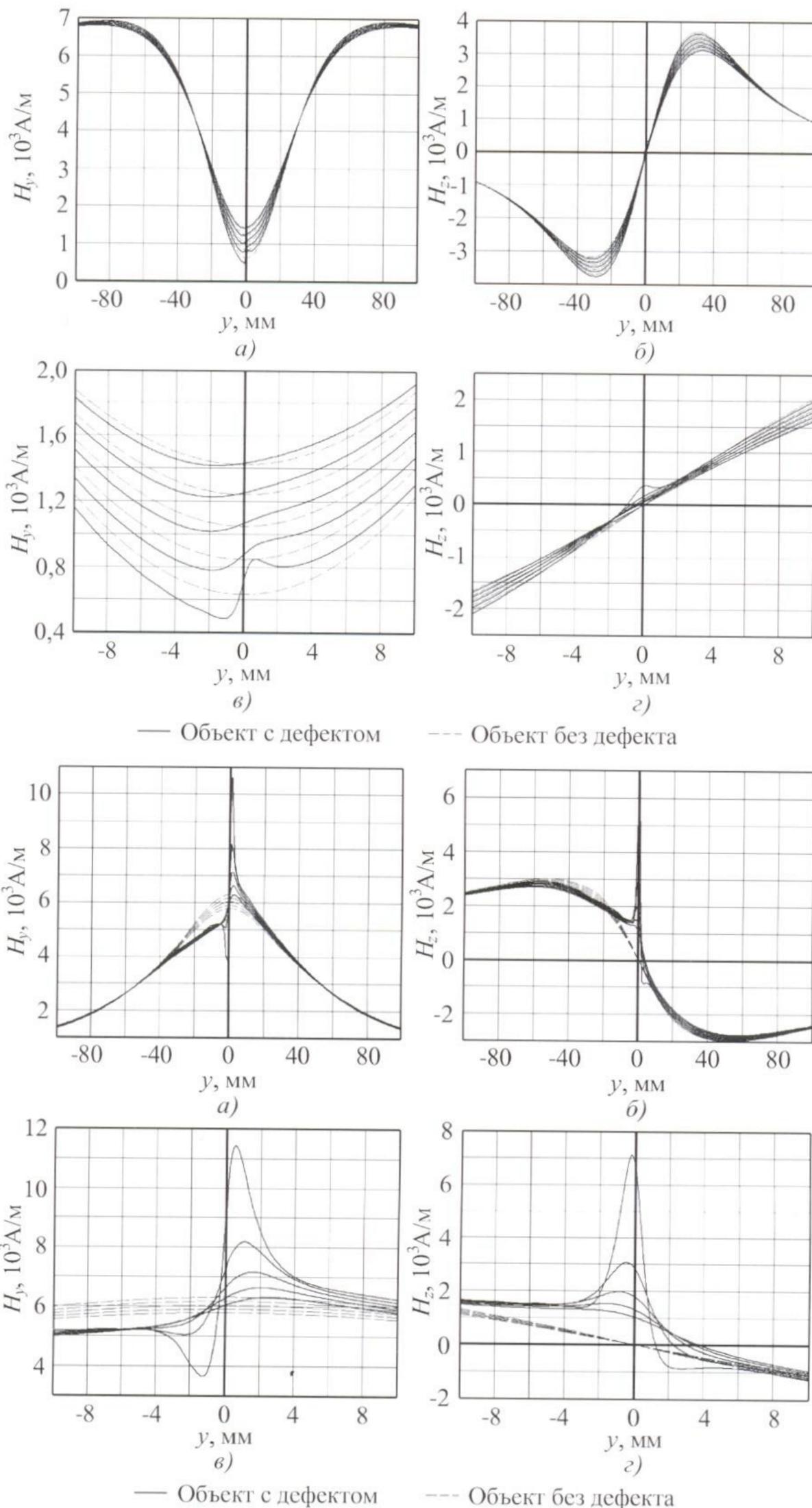


Рис. 11. Результат расчета магнитного поля трубы со смещением кромок при ее намагничивании продольным пропусканием электрического тока: а, б, в, г — см. рис. 7

Рис. 10. Результат расчета магнитного поля трубы со смещением кромок при ее намагничивании однородным внешним полем:

а, б, в, г — см. рис. 7

Выводы

1. Предложено программное обеспечение и технология его использования для численного моделирования операций намагничивания, характерных для неразрушающего контроля магнитным методом объектов сложной геометрической формы при наличии в них произвольных дефектов сплошности с учетом нелинейных свойств ферромагнетика. Включение в ПО библиотеки моделей источников намагничивания позволяет выполнять вычислительные эксперименты при условиях, максимально приближенных к реальным случаям контроля.

2. Разработанное программное обеспечение предоставляет возможность путем многофакторного вычислительного эксперимента осуществить выбор вида, способа и эффективных режимов намагничивания объектов контроля конкретной формы, исходя из условий достижения максимума значений напряженности поля рассеяния дефекта.

3. На модельных примерах показана возможность дифференциации дефектов типа непровара и смещения кромки по конфигурации информационного магнитного поля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шелихов Г.С. Анализ зарубежных стандартов по магнитопорошковому контролю деталей // Контроль. Диагностика. 2006. № 9. С. 61–71.
2. Кулеев В.Г., Дубов А.А., Лопатин В.В. Поле рассеяния от дефектной

области при намагничивании ферромагнитных труб поперечным магнитным полем // Контроль. Диагностика. 2002. № 12. С. 45–51.

3. Muzhickii V.F., Karabchevskii V.A. Magnetic field analysis for arched surface cracks // Nondestructive Testing and Evaluation. 1477–2671. V. 6. Issue 5, 1992. P. 287–296.

4. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Курозаев В.П. Магнитное поле дефекта типа трещины в ферромагнитной трубе // Дефектоскопия. 1999. № 5. С. 18–30.

5. Гальченко В.Я., Остапушенко Д.Л. Численный анализ пространственной конфигурации магнитных полей объектов сложной геометрической формы с учетом нелинейных характеристик веществ // Информационные технологии. 2008. № 8. С. 43–49.

6. Гальченко В.Я., Остапушенко Д.Л., Воробьев М.А. Математическое моделирование процессов намагничивания ферромагнитных объектов контроля с произвольной геометрией в полях заданной пространственной конфигурации // Дефектоскопия. 2008. № 9. С. 3–18.

7. Гальченко В.Я., Остапушенко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений // Дефектоскопия. 2009. № 3. С. 56–66.

8. Гальченко В.Я., Остапушенко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей подповерхностных дефектов сплошности конечных размеров и произвольной формы в объектах контроля ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений // Дефектоскопия. 2009. № 5. С. 60–71.

9. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Т. 2 / под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1986. 351 с.

10. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 488 с.

11. Зацепин Н.Н., Коржова Л.В. Магнитная дефектоскопия. Мн.: Наука и техника, 1981. 208 с.

12. Мужичкий В.Ф., Кудрявцев Д.А. Некоторые вопросы определения оптимальных размеров намагничивающих систем на постоянных магнитах // Дефектоскопия. 2004. № 2. С. 67–75.

13. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. М.: Энергоатомиздат, 1985. 272 с.

14. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 3–10.

УДК 614.082.73+681.883.474

С.А. Баталов

(Уфимская государственная академия сервиса)

E-mail: geoavtsyst@mail.ru

Акустическая система технической диагностики параметров эксплуатируемого нефтегазового месторождения

Рассмотрена система для диагностики изнашиваемых интервалов нефтяных пластов по регистрируемым значениям вектора шумовых параметров. Система непрерывно функционирует в контрольной скважине месторождения в течение всей поздней стадии его разработки. Она состоит из наземного и скважинного телеметрических блоков с возобновляющимся источником питания и пьезодатчика, в качестве линии связи применяется акустический волновод на основе скважинной скребковой проволоки.

The article introduces a system for diagnostics of wearing intervals of oil formations on registrable values of a sound parameter vector. The system is continuously functioning in a monitor well of a field in course of the whole late stage of its development. It consists of ground and borehole telemetry units with a renewable power supply source and a piezosensor. As a flow line an acoustic waveguide is used on the basis of a well scraper wire.

Ключевые слова: акустическая система технической диагностики, акустический волновод, пьезодатчик, возобновляющийся источник питания, контрольная скважина.

Key words: acoustic system of technical diagnostics, acoustic waveguide, piezosensor, renewable power supply source, monitor well.

В работе рассматривается метод определения несовершенства системы "скважина–пласт" в водонапорном режиме эксплуатации нефтегазового ме-

сторождения [1, 2]. На ранней стадии разработки месторождений измерения закачиваемых в пласт дебитов воды, а также добываемых дебитов нефтя-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Батаев А.А., Батаев В.А.** Композиционные материалы. Новосибирск: НГТУ, 2002. 378 с.
2. **Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др.** Композиционные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
3. **Гершберг М.В., Илюшин С.В., Смирнов В.И.** Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. Л.: Судостроение, 1971. 199 с.
4. **Давыдов В.В., Маттес Н.В., Сиверцев И.Н., Трянин И.И.** Прочность судов внутреннего плавания: справочник. М.: Транспорт, 1978. 580 с.
5. **Киреев В.А., Толстобров Е.П.** Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойных сотовых панелей при поперечном изгибе // Тр. ЦАГИ. Вып. 1872. М., 1977. С. 3–17.
6. **Ланге Ю.В.** Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций из композитных материалов. М.: Машиностроение, 1991.
7. **Лизин В.Т., Пяткин В.А.** Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 2003. 447 с.
8. **Определение дефектов** корпуса судна из композиционных материалов методами неразрушающего контроля: науч.-техн. отчет Московского филиала Российского Речного Регистра. М., 2006. 65 с.
9. **ОСТ 5.1068–75.** Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчеты прочности. Л.: ЦНИИТС, 1975.
10. **ОСТ 5.9102–87.** Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля. Л.: ЦНИИТС, 1987.
11. **Полилов А.Н. и др.** Влияние расслоений на прочность углепластиков при сжатии // Авиационные материалы. М., 1986. С. 5–11.
12. **Потапов А.И., Пеккер Ф.П.** Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. Л., 1977. 192 с.
13. **Российский Речной Регистр.** Временная методика исследования корпусов судов с динамическим способом поддержания (глицсирующих) методами неразрушающего контроля с целью выявления дефектов типа расслоение. М., 2007. 8 с.
14. **Российский Речной Регистр.** Правила. Т. 1. М.: По Волге, 2002. 270 с.
15. **Российский Речной Регистр.** Правила. Т. 2. М.: По Волге, 2002. 400 с.
16. **Францев М.Э.** Эксплуатационные дефекты корпусов стеклопластиковых судов // Катера и яхты. 2008. № 2. С. 90–93; № 3. С. 102–105.
17. **Францев М.Э.** Причины возникновения эксплуатационных дефектов корпусов судов из композиционных материалов: докл. на конференции Российского Речного Регистра в рамках 2-й Междунар. спец. выст. "Московское Боут Шоу - 2009". М., 2009.



ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4
 Учредители: РОНКТД; ООО "Издательский дом "Спектр" E-mail: td@mashin.ru; kdpost@rambler.ru
 Телефоны редакции журнала: (499) 268-36-54; (495) 514-76-50. [Http://www.Mashin.ru](http://www.Mashin.ru)
 Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры: *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
 Сдано в набор 08.09.09 г. Подписано в печать 26.10.09 г.
 Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,82. Уч.-изд. л. 9,07. Заказ 952. Свободная цена.
 Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
 Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.

10TH RSNTTD ECNDT

Moscow 2010, June 7-11



EF European Federation for
Non-Destructive Testing
NDT



Российское общество по
неразрушающему контролю
и технической диагностике
(РОНКТД)

10-я Европейская конференция и выставка по неразрушающему контролю

Москва, 7–11 июня, 2010 г.

Место проведения:
Москва, Экспоцентр



Секретариат:
119048, Москва, ул. Усачева, 35, стр.1
Тел.: +7 (499) 246-71-32
Факс: +7 (499) 246-71-32 / 246-88-88
e-mail: info@ecndt2010.ru, Home page: www.ecndt2010.ru

Тематические разделы:
ТЕХНОГЕННАЯ ДИАГНОСТИКА
АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, РИСКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Официальный язык конференции – английский

Прием тезисов докладов до 1 ноября 2009 г.
Представление текста докладов до 1 января 2010 г.

Диагностика – основа безопасности