

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ
ХОЛЛОВСКИЙ МАГНИТОМЕТР

© 2016 г. Х. Р. Ростами

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

E-mail: rostami@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.04.2015 г.

На основе двух преобразователей Холла разработан низкочастотный магнитометр с чувствительностью $2.5 \cdot 10^{-3}$ Гс/Гц^{1/2}. Динамический диапазон магнитометра по магнитному полю на частоте 19 Гц составляет от $2.5 \cdot 10^{-3}$ до $\pm 8 \cdot 10^4$ Гс.

DOI: 10.7868/S0032816216010110

Для диагностических целей широко применяются холловские микроскопы [1–6], которые обеспечивают непосредственное измерение индукции магнитного поля, имеют сравнительно низкое пространственное разрешение и позволяют визуализировать магнитное микросостояние протяженных объектов. Кроме того, они обладают более широкими функциональными возможностями, просты в изготовлении и имеют низкую стоимость. Одним из основных узлов таких микроскопов является холловский магнитометр, позволяющий с высокой точностью регистрировать э.д.с. датчика Холла, пропорциональную измеряемому полю. В данной работе описан принцип действия разработанного нами для этой цели и простого в изготовлении магнитометра.

В [7] для измерения компонент B_x , B_y , B_z магнитного поля и величины поля $B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$ использовались три последовательно включенных преобразователя Холла. При питании преобразователей Холла от источника постоянного тока из-за наложения на э.д.с. Холла сигналов температурного происхождения [8], дрейфа “нуля” операционного усилителя, аппаратурных и внешних электромагнитных наводок невозможно достичь чувствительности выше 0.1 Гс/Гц^{1/2}. В работе [9] описан холловский магнитометр, работающий на переменном токе, с чувствительностью лучше 10^{-2} Гс/Гц^{1/2}. Как показано в работах [10, 11], путем поочередного пропуска импульсного тока через токовые и потенциальные контакты преобразователя Холла при последующей фильтрации импульсных помех и запоминании усредненного сигнала можно повысить чувствительность магнитометра до $\approx 10^{-4}$ Гс/Гц^{1/2}. Несмотря на то что была достигнута более высокая

чувствительность, методика не лишена недостатков. В частности, авторы не учли следующие факторы.

1. При усреднении сигналов от контактов преобразователей Холла промышленного производства, когда, как правило, ширины токовой и потенциальной полос существенно различаются, возникают ошибки измерения сигнала. Это в свою очередь приводит к снижению точности установки и усложнению интерпретации полученных результатов, особенно в случае высоких пространственных разрешений.

2. Пропускание более высокого тока, типичного для двойных токовых контактов, через одиночные слаботочные потенциальные контакты приводит к их быстрому выходу из строя, особенно при термоциклировании образцов.

3. Как следует из опубликованных работ, подавление помех при импульсном переключении тока вызывает определенные трудности, что вынудило авторов использовать более дорогую элементную базу, усложнять принципиальную электрическую схему магнитометра и т.д.

Разработанный нами магнитометр, кроме температурной и полевой зависимостей плотности магнитного потока и его градиента, позволяет также измерять гистерезисные кривые локальной намагниченности или магнитного момента образцов. Для этого используются два максимально идентичных по физико-техническим характеристикам преобразователя Холла $ПХ_1$, $ПХ_2$. Датчики включены в противофазе и отдельно запитываются от двух идентичных высокостабильных источников переменного тока. Оба преобразователя расположены в одной плоскости, при этом $ПХ_1$ находится под образцом, а $ПХ_2$ — далеко от образ-

ца, в невозмущенном образцом поле. Противофазное включение преобразователей позволяет компенсировать влияние внешнего поля и измерять момент или намагниченность образца. При повышении температуры сверхпроводящего образца выше критической T_c регулировкой тока источника, питающего $ПХ_2$, сводится к нулю гистерезис намагниченности образца во всем диапазоне развертки поля. Эти данные вводятся в компьютер для определения поправочной функции в заданном интервале температур и магнитных полей. Далее, понижая температуру ниже T_c , проводят измерения.

Блок-схема магнитометра приведена на рис. 1. Магнитометр работает следующим образом. Синусоидальный сигнал частотой 19 Гц от задающего генератора синусоидального напряжения $ГСН$ поступает на высокостабильные источники тока $ИТ_1$ и $ИТ_2$, питающие $ПХ_1$ и $ПХ_2$. Сигналы с контактов $ПХ_1$ и $ПХ_2$ поступают на входы идентичных масштабных дифференциальных усилителей $МДУ_1$ и $МДУ_2$, коэффициенты усиления которых синхронно, в зависимости от уровня измеряемого сигнала, устанавливаются вручную или при помощи компьютера.

Далее сигналы с выходов $МДУ_1$ и $МДУ_2$ подаются на один из входов идентичных дифференциальных усилителей $ДУ_1$ и $ДУ_2$, на вторые входы которых поступают прошедшие через фазовращатели $ФВ_1$ и $ФВ_2$ сигналы с компенсирующих

сопротивлений $R_{к1}$ и $R_{к2}$. Для регистрации магнитного поля под образцом (сигналы от $ПХ_1$) и вдали от образца (сигналы от $ПХ_2$) выходы $ДУ_1$ и $ДУ_2$ через переключатель $П$ разделяют и подключают к входу синхродетектора $СД$ (нановольтметр с синхродетектором Unipan 232 В или УПИ-2), на опорный вход которого подается сигнал от $ГСН$. Выходной сигнал $СД$ компенсируется и усиливается дифференциальным усилителем $ДУ_4$. Для снятия гистерезисной кривой магнитного момента образца дифференциальный усилитель $ДУ_3$ подключают к выводу $ДУ_3$ (регистрирует разностный сигнал с выходов $ПХ_1$ и $ПХ_2$). Выходной сигнал $ДУ_4$ поступает в компьютер.

Оптимальная рабочая частота магнитометра выбрана равной 19 Гц, исходя из следующих экспериментальных факторов.

1. Так как электронная схема магнитометра питается от сети, то электромагнитные помехи по цепи идут в основном на частоте 50 Гц и на ее гармониках. С целью исключения попадания их в полосу пропускания $СД$ частота его опорного сигнала выбрана далеко от сетевой частоты и ее гармоник.

2. Работа на более высокой частоте, 0,1–10 кГц, хотя и позволяет избавиться от низкочастотных помех, но создает такие проблемы, как влияние паразитных емкостей из-за перемещения в про-

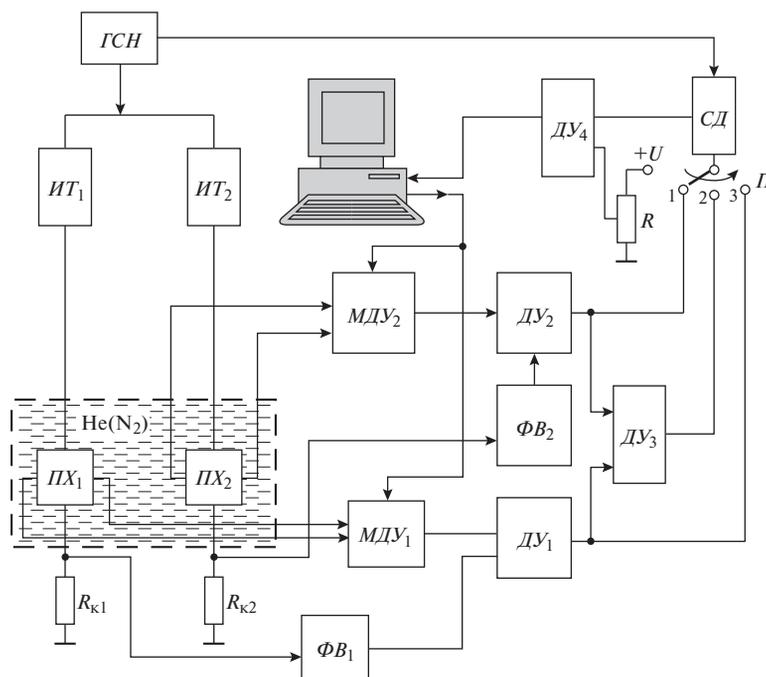


Рис. 1. Блок-схема магнитометра. $ГСН$ – задающий генератор; $ИТ$ – источники тока; $ПХ_1$ и $ПХ_2$ – преобразователи Холла; $МДУ$ – масштабные дифференциальные усилители; $ДУ$ – дифференциальные усилители; $ФВ$ – фазовращатели; $П$ – переключатель; $СД$ – синхродетектор.

странстве движущихся относительно осей X , Y , Z частей столика микроскопа.

3. С ростом рабочей частоты увеличивается разность фаз между токами $I_{ПХ}$ через преобразователи Холла и э.д.с. Холла $U_{xx}(B)$. Искажается форма зависимости $U_{xx}(B)$, что сильно сказывается при регистрации слабых магнитных полей. Для уменьшения погрешностей, связанных с влиянием собственного поля тока $ПХ$ на показания $ПХ$ и физические параметры исследуемого объекта, поле, созданное током через преобразователи Холла, тщательно компенсировалось. Для этого токи от регулируемых источников (идентичных источникам $ИТ_1$, $ИТ_2$), противофазные току, питающему $ПХ$, подводились по проводам, бифилярно намотанным (с малым шагом накрутки) на провода, соединенные с токовыми контактами $ПХ_1$, $ПХ_2$. Вблизи $ПХ_1$ и $ПХ_2$ на обратной стороне подложки провода проходили параллельно токовым полосам и были приклеены.

Так как одна из основных задач — обеспечение высокой чувствительности магнитометра — связана с цепью питания $ПХ$ и схемой регистрации э.д.с. Холла, рассмотрим подробнее эти вопросы.

Принципиальная электрическая схема источника питания $ПХ$ приведена на рис. 2. На микросхемах M_1 — M_3 собран преобразователь напряжение—ток с повышенной выходной мощностью.

Разделение таких функций, как усиление тока, осуществляемое операционным усилителем M_2 и эмиттерными повторителями на транзисторах T_1 — T_4 , вычитание/усиление, реализуемое микросхемой M_3 и резисторами R_1 — R_4 , а также усиление с обратной связью (микросхема M_1), позволило избежать сложностей, возникающих при настройке источника, и существенно расширить его динамический диапазон. Потенциометром R_5 устанавливался требуемый ток на выходе источника. Входное и выходное сопротивления источника соответственно равны $R_{вх} > 10^6$ Ом, $R_{вых} > 10^7$ Ом. На частоте 19 Гц при токе через $ПХ$ $I_{ПХ} = 100$ мА и изменении нагрузки в диапазоне 0—68 Ом неустойчивость тока была меньше 0.01%. Коэффициент нелинейных гармоник в полосе 0—100 Гц менее 0.01%. Неустойчивость тока за 8 ч работы источника на частоте 19 Гц с током нагрузки 100 мА при комнатной температуре 20°C была <0.01%. Коэффициент нелинейных гармоник и температурная неустойчивость источника определялись в основном характеристиками задающего прецизионного генератора ГЗ-113.

Принципиальная электрическая схема блока регистрации приведена на рис. 3. Сигнал с контактов $ПХ$ через повторители M_1 , M_2 поступает на дифференциальный усилитель M_3 . Переключателем $ПК_1$ задается коэффициент усиления M_4 в за-

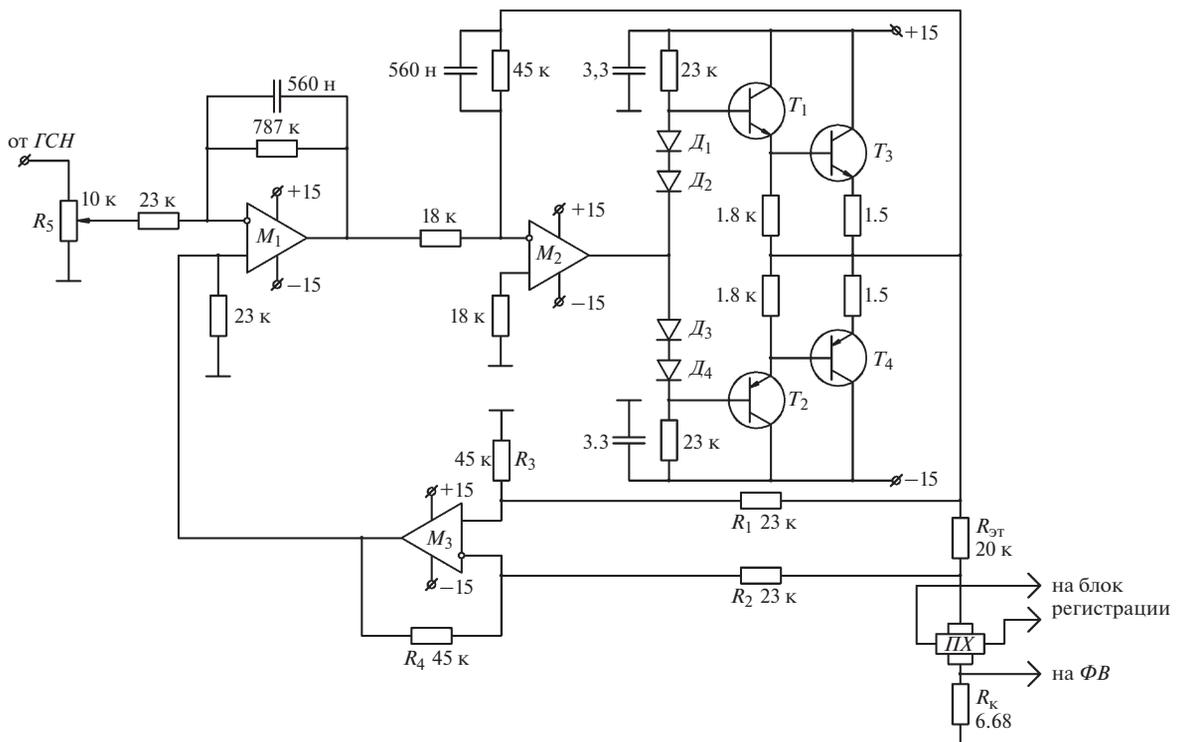


Рис. 2. Принципиальная схема источника. M_1 , M_2 — К140УД6Б, M_3 — К140УД17Б; T_1 , T_3 — КТ972А, T_2 , T_4 — КТ973А; $Д_1$ — $Д_4$ — КД503А; R_5 — СПЗ; все резисторы — С2-29.

висимости от диапазона измеряемых полей. Переключение диапазона измеряемых полей можно осуществлять от компьютера, используя вместо $ПК_1$ аналоговый коммутатор. Фазовращатель, собранный на микросхемах M_6-M_{12} , обеспечивает регулировку фазы сигнала с контактов $ПХ$ относительно $I_{ПХ}$ на $\pm 90^\circ$ резисторами R_1, R_2 (грубо) и R_3 (плавно). Сигнал на вход фазовращателя поступает от сопротивления R_k , величина которого выбрана равной $\sim(1/2)R_{вх}$. Сопротивление R_k включено в токовую цепь последовательно между $ПХ$ и земляной шиной (см. рис. 2) для исключения закорачивания плеч $ПХ$ (см. эквивалентную схему $ПХ$ [8]). Переключатель $ПК_2$ служит для изменения фазы на 180° , контакты 3, 4 предназначены для контроля изменения сигналов и их фазы. Так как сигналы с контактов $ПХ$ и от R_k выравнены по амплитуде, то всякое неконтролируемое изменение амплитуды тока $I_{ПХ}$ и уход его фазы дополнительно компенсируются дифференциальным усилителем M_5 . Настраивают магнитометр резисторами R_1-R_4 , добиваясь наименьшего показания $СД$ в отсутствие внешнего магнитного поля, после чего остаточный выходной сигнал $СД$ компенсируется и усиливается дифференциальным усилителем M_{13} . Благодаря применению процедуры “первоначального вычитания – усиления – повторного двухкратного вычитания” повышается точность компенсации остаточного напряжения (уровень $U_{xx}(B)$ существенно повышается, превышая уровень собственных шумов $ОУ$).

Предложенная схема в случае сочетания постоянных и переменных внешних магнитных полей может быть использована для анализа гармоник активных и реактивных составляющих магнитной проницаемости, магнитной восприимчивости и поверхностного импеданса образцов [12, 13]. Применение в схеме магнитометра высокочастотных $ОУ$ [14, 15] позволяет существенно повысить рабочую частоту магнитометра (данная схема обеспечивает получение характеристики в частотном диапазоне до 5 кГц) и выполнять измерения переменных магнитных полей на частоте $I_{ПХ}$, суммарной или разностной с предполагаемой частотой измеряемого переменного поля [8].

Разработанная схема может в принципе позволить регистрировать сигнал, уровень которого намного ниже минимального порога возникновения э.д.с. Холла. Такая высокая чувствительность может быть достигнута в случае использования в электронной части установки высокостабильной по температуре элементной базы, а в предварительной цепи в качестве операционных усилителей – прецизионного $ОУ$ типа 140УД24 [14] или его зарубежных аналогов. Для очистки сигнала от шумов и его обработки целесообразно использовать автоматизированный метод вейвлет-преобразования [16].

Магнитометр, в частности, был использован нами для исследования эффекта захвата магнитного потока в сверхпроводниках. Для экспериментов были выбраны монокристаллы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с критической температурой перехода в сверхпроводящее

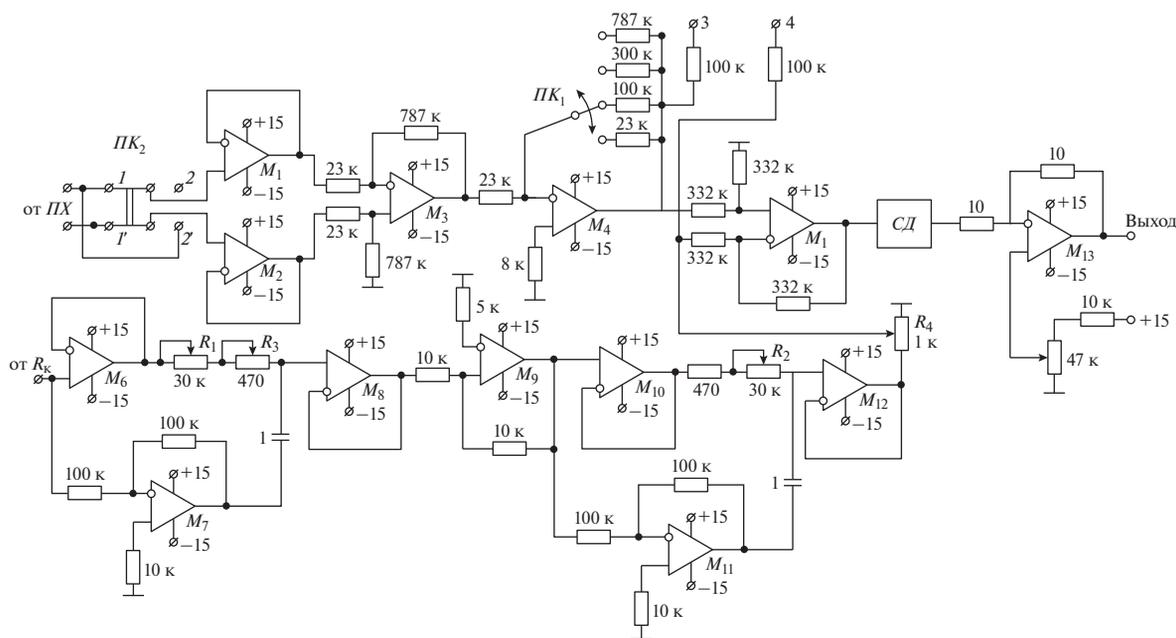


Рис. 3. Принципиальная схема блока регистрации. M_1-M_5 – К140 УД17Б, M_6-M_{13} – К140 УД7Б; потенциометры – СПЗ; все резисторы – С2-29; $ПК$ – переключатели.

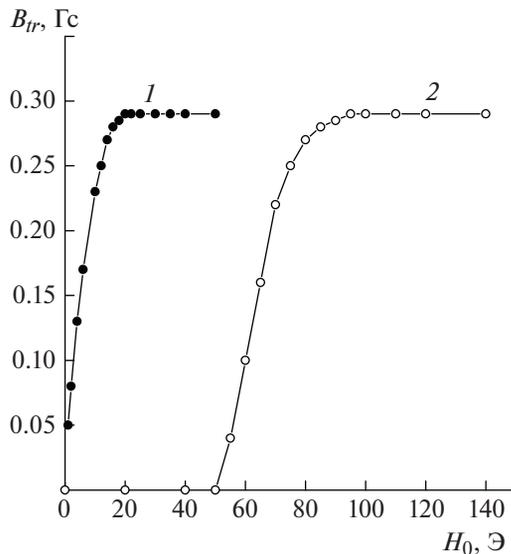


Рис. 4. Типичные зависимости плотности захваченного магнитного потока B_{tr} от внешнего магнитного поля H_0 , измеренные непосредственно на поверхности исследуемых образцов в режимах охлаждения образца в магнитном поле (1) и в отсутствие магнитного поля (2).

состояние $T_c \approx 91$ К и размерами $\sim 1 \times 1 \times 0.05$ мм, $2 \times 1 \times 0.05$ мм, $0.8 \times 0.7 \times 0.05$ мм.

Измерение плотности захваченного магнитного потока проводилось при температуре жидкого азота $T \approx 77.4$ К в стационарных магнитных полях до 0.13 Тл. При исследованиях были использованы преобразователи Холла на основе гетероэпитаксиальных структур антимида индия. Токовые и холловские контакты преобразователя Холла, разработанного на основе датчика ПХЭ 607118А1 отечественного производства, были утоплены в глубь подложки, а провода подведены к ее боковым сторонам. Размер рабочей поверхности ПХ составлял 100×50 мкм; магнитная чувствительность — 207 мкВ/Тл³ при токе 100 мА; остаточное напряжение 90 мкВ; входное сопротивление — 13.4 Ом, выходное — 15.1 Ом. В принципе магнитометр рассчитан на использование ПХ с параметрами в широком диапазоне как изготовленного в лабораториях, так и промышленного производства, включая импортные образцы

[4]. При измерениях использовались режимы охлаждения образца в магнитном поле и в отсутствие магнитного поля. Поле направлено перпендикулярно плоскости образцов. Методика подробно описана в [5, 6].

На рис. 4 приведены типичные зависимости плотности захваченного магнитного потока B_{tr} от внешнего магнитного поля H_0 , полученные непосредственно на поверхности исследуемых образцов в указанных выше режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oral A., Bending S.J., Henini M. // J. Vac. Sci. Technol. 1996. V. B 14. P. 1202.
2. Gregory J.K., Bending S.J., Sandhu A. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. P. 3515.
3. Cambel V., Fedor J., Gregusova D., Kovac P., Husek I. // Supercond. Sci. Technol. 2005. V. 18. P. 417.
4. <http://www.nanomagnetics-inst.com/en>
5. Rostami Kh.R. // Am. Mod. Phys. 2013. V. 2. № 1. P. 21.
6. Rostami Kh.R // Journal of Low Temperature Physics. 2014. V. 177. № 3/4. P. 99; doi 10.1007/s10909-014-1191-8
7. Андронов О.И., Бровченко В.Г., Дудин В.И., Ольховский А.Г., Цыганков М.М., Щеглов С.И. // ПТЭ. 1997. № 3. С. 64.
8. Кучис Е.В. // Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990.
9. Ростами Х.Р. // ПТЭ. 1993. № 6. С. 182.
10. Игнатъев В.К., Протопопов А.Г. // ПТЭ. 2003. № 4. С. 116.
11. Голубев А.А., Игнатъев В.К., Никитин А.В. // ПТЭ. 2008. № 5. С. 123.
12. Буш А.А., Гладышев И.В., Гордеев С.И., Жуков А.А. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1989. Т. 2. С. 78.
13. Бондаренко С.И., Шеремет В.И. // Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1982.
14. Якубовский С.В., Ниссельсон Л.И., Кулешова В.И., Ушибышев В.А., Топешкин М.Н. // Справочник. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы. М.: Радио и связь, 1990.
15. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. // Электроника. М.: Высшая школа, 1991.
16. Борисенко Н.А., Фертман А.Д. // ПТЭ. 2003. № 2. С. 28.