



УДК 621.314.212:620.111.3
DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-70-74

**А. А. КУЗНЕЦОВ
В. В. ХАРЛАМОВ
М. А. ВОЛЧАНИНА**

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье приводится алгоритм обработки данных при диагностировании изоляции акустическим методом силовых трансформаторов системы электроснабжения железных дорог. Особенностью системы электроснабжения железнодорожного транспорта является расположение тяговых подстанций вдоль железнодорожного пути. Эксплуатация силовых трансформаторов осуществляется в открытых условиях. Показано, что для диагностирования силовых трансформаторов целесообразно использовать переносные комплексы на основе акустического контроля частичных разрядов благодаря их высокой мобильности и относительной простоте установки. Для повышения достоверности диагностирования в условиях сезонных изменений температуры предложено использовать имитатор дефектов и дифференциальный способ измерения параметров частичных разрядов. Предложены схема проведения эксперимента и алгоритм диагностирования. Приведены выражения, описывающие свойства трансформаторного масла при изменении температуры и, как следствие, изменение параметров сигнала при распространении акустических волн. Приводятся данные диагностирования, полученные на силовом трансформаторе системы электроснабжения железных дорог при положительных и отрицательных значениях температуры в условиях развития дефекта изоляции, сопровождающегося частичными разрядами.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, акустический метод, частичные разряды, диагностирование изоляции, устройство имитации дефектов, параметры сигналов.

Для диагностирования высоковольтного оборудования используется ряд методов, среди которых акустический метод с регистрацией частичных разрядов находит все большее применение [1]. Об-

щей задачей повышения эффективности методов диагностирования является интерпретация данных эксперимента [2]. На результаты измерений могут оказывать влияние негативные факторы [3, 4].

В данной статье рассматривается устройство и алгоритм проведения измерений и обработки данных акустического контроля для уменьшения влияния сезонных изменений температуры на выходные параметры измерений.

Основной причиной затухания акустических волн является сила вязкого сопротивления между соседними частицами среды, обладающими различными скоростями, она учитывается следующими параметрами распространения [5, 6]:

α — коэффициент затухания, который можно вычислить по формуле (1)

$$\alpha = \frac{b\omega^2}{2\rho_0 V_l^3} = \frac{\omega^2}{2\rho_0 V_l^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \eta' + x \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (1)$$

где ω — круговая частота, 1/с;

V_l — скорость распространения акустической волны в среде, м/с;

ρ_0 — удельная плотность среды, кг/м³;

η — коэффициент сдвиговой (поперечной) вязкости, Па·с;

η' — коэффициент объемной вязкости, Па·с;

x — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

c_v — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

Из выражения (1) определяется эффективный коэффициент вязкости b :

$$b = \frac{4}{3}\eta + \eta' + x \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right). \quad (2)$$

При увеличении температуры эффективный коэффициент вязкости трансформаторного масла уменьшается, следовательно, уменьшается коэффициент затухания α , при уменьшении температуры оба коэффициента увеличиваются. Для вязкого трансформаторного масла амплитуда акустических волн при распространении затухает меньше, следовательно, на акустическом преобразователе, установленном на стенке масляного бака, амплитуда сигнала будет больше и, наоборот, при менее вяз-

ком масле амплитуда сигнала будет меньше при одинаковом расстоянии и уровне сигнала от источника частичных разрядов (ЧР) [7, 8].

Увеличение амплитуды акустических импульсов, вызванных частичными разрядами в силовых трансформаторах при сезонном изменении температуры, можно ложно принять за нарастание дефекта. Применение имитатора дефектов позволяет избежать подобных ошибок. Идея использования имитатора дефектов заключается в одновременных измерениях сигналов на силовом трансформаторе и имитаторе дефектов при одинаковых температурах [9].

Для компенсации температурных погрешностей, вызванных сезонными изменениями температуры, изменениями вязкости и коэффициента затухания при распространении акустических волн и, как следствие, уменьшением амплитуды, частотных характеристик, формы сигнала, дополнительно введен блок имитатора дефектов.

На рис. 1 представлена схема устройства для регистрации параметров частичных разрядов на силовом трансформаторе с применением имитатора дефектов. Более подробно работа устройства для мониторинга силовых трансформаторов (рис. 1) описана в работах [9, 10].

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 — силовой трансформатор (СТ); 2 — имитатор дефектов (ИД); 3 — блок питания (БП); 4 — электронный коммутатор (ЭК); 5 — генератор тактовых импульсов (ГТИ); 6 — понижающий трансформатор (ПТ); 7 — маслонаполненный бак (МБ); 8 — датчик измерения температуры масла ИД; 9 — датчик измерения температуры масла СТ; 10 — блок цифровой акустической диагностики (БЦАД); 11 — электрический разрядник; 12 — акустические датчики; 13 — устройство подогрева масла ИД; 14 — блок расчетных моделей (БРМ); 15 — блок визуализации контролируемых параметров (БВКП).

Для реализации способа повышения достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных и технологических изменений температуры разработан алгоритм диагностирования силовых трансформаторов с использованием имитатора дефектов, благодаря которому повышается достоверность диагноза текущего состояния силового трансформатора.

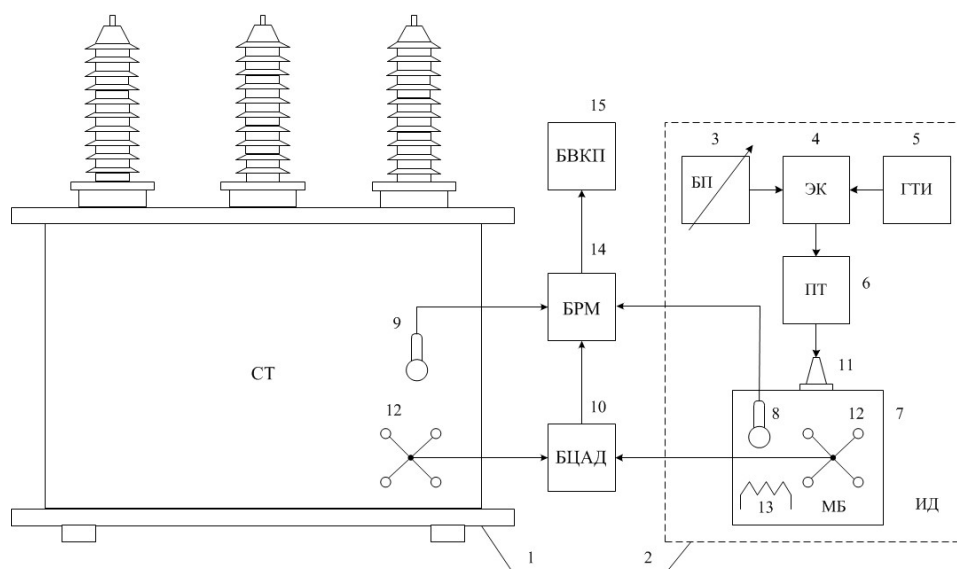


Рис. 1. Схема устройства для регистрации параметров частичных разрядов на силовом трансформаторе с применением имитатора дефектов

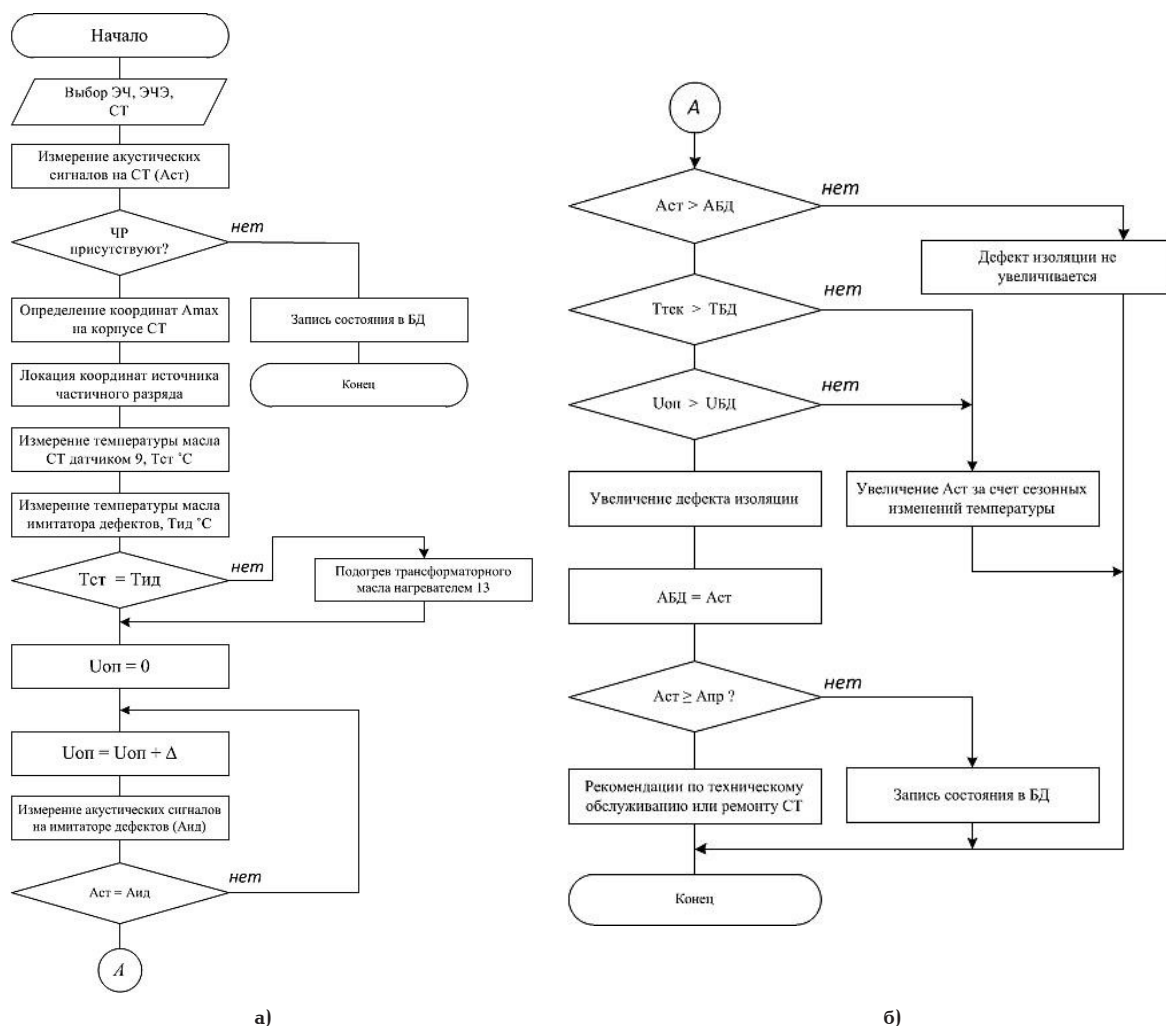


Рис. 2. Алгоритм диагностирования силового трансформатора с использованием имитатора дефектов

Последовательность действий при диагностировании силовых трансформаторов системы электроснабжения железных дорог заключается в следующем: на корпус силового трансформатора устанавливаются датчики акустического контроля и измеряются амплитуды акустических сигналов (A_{CT}). По зарегистрированным амплитудам и форме определяют, есть ли сигналы, соответствующие частичным разрядам, если таких сигналов нет, то данные диагностирования заносятся в базу данных. Если частичные разряды обнаружены, следует определить координаты сигнала с максимальной амплитудой на корпусе силового трансформатора (A_{max}).

Увеличение амплитуды импульсов, вызванных частичными разрядами в силовых трансформаторах при сезонных и технологических изменениях температуры, можно ложно принять за нарастание дефекта. Применение имитатора дефектов позволяет избежать подобных ошибок. Если при измерении температуры датчиком 9 температура масла силового трансформатора (T_{CT}) не равна температуре масла имитатора дефектов ($T_{ИД}$), то масло внутри имитатора дефектов подогревают при помощи нагревателя 13. Если при изменении температуры значение опорного напряжения ($U_{оп}$) на имитаторе дефектов не изменяется, следовательно, дефект изоляции не развивается во времени, а увеличение амплитуды связано с изменениями

свойств трансформаторного масла. Данные измерений записываются в базу данных. Если при изменении параметров акустического сигнала наблюдается увеличение опорного напряжения ($U_{оп}$) на имитаторе дефектов при сезонных и технологических изменениях температуры, то наблюдается развитие дефекта диагностируемого силового трансформатора. Оперативно-технический персонал получает рекомендации по техническому обслуживанию или ремонту силового трансформатора.

Применение имитатора дефектов снижает влияние сезонных и технологических изменений температуры на результаты акустического контроля, благодаря дифференциальным измерениям на объекте контроля и источнике образцовых сигналов — ИД.

В алгоритме, представленном на рис. 2а, б, приняты следующие обозначения: ЭЧ — номер дистанции электроснабжения; ЭЧЭ — номер тяговой подстанции; СТ — силовой трансформатор; ИД — имитатор дефектов; ЧР — частичные разряды; A_{CT} — значение амплитуды частичных разрядов на силовом трансформаторе, ед. АЦП; $A_{ИД}$ — значение амплитуды частичных разрядов на имитаторе дефектов, ед. АЦП; $A_{пр}$ — предельное значение амплитуды частичных разрядов на силовом трансформаторе, ед. АЦП; A_{max} — максимальное значение амплитуды частичных разрядов на силовом трансформаторе, ед. АЦП; БД — база данных; T_{CT} — температура масла силового трансформато-

Данные акустических измерений при положительных и отрицательных температурах

| Тип трансформатора | Дата измерения | A_{max} ед. АЦП | A_{mod} ед. АЦП | Число событий | T , °C | $U_{оп}$, В |
|--------------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------|----------|--------------|
| ТДН-16000/110 | 11.05.2021 | 1300 | 220 | 187 | +21 | 9,1 |
| | 02.03.2022 | 1300 | 420 | 5285 | -5 | 10,8 |

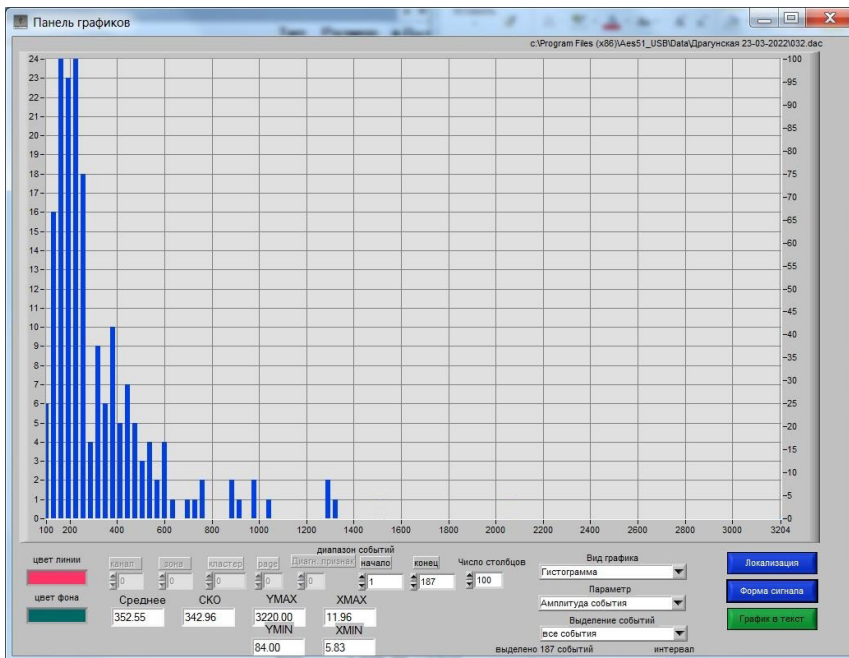


Рис. 3. Измерения при положительной температуре 11.05.2021

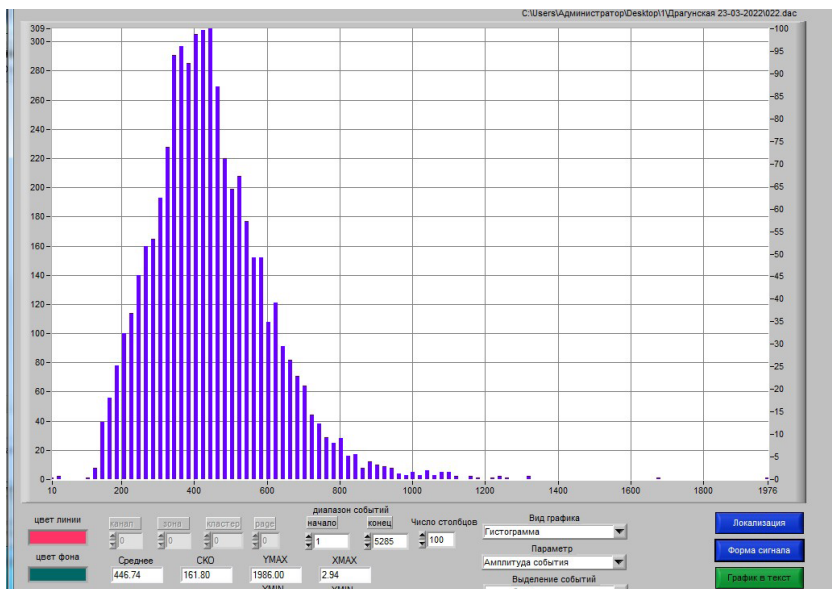


Рис. 4. Измерения при отрицательной температуре 02.03.2022

ра, °C; $T_{ДА}$ — температура масла имитатора дефектов, °C; $T_{тек}$ — текущая температура масла имитатора дефектов, °C; $T_{ГА}$ — температура масла имитатора дефектов, хранящегося в базе данных, соответствующее текущему измерению °C; $U_{оп}$ — опорное напряжение блока питания имитатора дефек-

тов, В; Δ — шаг изменения опорного напряжения, В; $U_{ДА}$ — напряжение на имитаторе дефектов, хранящееся в базе данных, соответствующее текущему измерению, В.

В качестве примера обработки данных по представленному алгоритму были проведены измере-

ния на СТ тяговой подстанции постоянного тока системы электроснабжения железнодорожного транспорта Омской дистанции электроснабжения. Измерения выполнялись в различные промежутки времени с сезонным изменением температуры. Данные о проведенных измерениях представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что максимальные амплитуды сигналов, регистрируемые акустическими преобразователями A_{max} , не изменились и равны 1300 ед. АЦП. Однако измерения выполнялись при различных температурах окружающего воздуха (+21 и -5 °С соответственно), при которых вязкость трансформаторного масла различна. В этом случае следует обратить внимание на значение $U_{оп}$ имитатора дефектов (9,1 и 10,8 В соответственно). Это говорит о том, что при одинаковой максимальной амплитуде на СТ имитатор дефектов во втором случае выдавал более мощные импульсы, что соответствует увеличению сигнала на диагностируемом трансформаторе, и, как следствие, увеличению дефекта.

Гистограммы зарегистрированных сигналов при положительных и отрицательных температурах окружающего воздуха представлены на рис. 3 и рис. 4. На положительную динамику развития дефекта так же указывает число импульсов, зарегистрированных за время измерений 60 с в обоих случаях (187 и 5285 соответственно). Также увеличились модовые значения A_{mod} на гистограмме амплитуд зарегистрированных сигналов (220 и 420 ед. АЦП соответственно), что так же свидетельствует о положительной динамике развития дефекта изоляции СТ по параметрам зарегистрированных ЧР.

При использовании имитатора дефектов повышается достоверность диагностирования дефектов и динамики их изменения методом регистрации ЧР при сезонных изменениях температуры для СТ, находящихся в эксплуатации на открытом воздухе вне производственных помещений.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90231.

Библиографический список

1. Карандаев А. С., Евдокимов С. А., Девятков Д. Х. [и др.]. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов // Вестник МГТУ им. Носова. 2012. № 1. С. 105–108.
2. Markalous S. M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. Vol. 15 (6). P. 1576–1583. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712660.
3. Strachan S. M., Rudd S., McArthur S. D. J. [et al.]. Knowledge-based diagnosis of partial discharges in power transformers // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. Vol. 15 (1). P. 259–268. DOI: 10.1109/T-DEI.2008.4446759.
4. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Ивлиев В. В. [и др.]. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. Новосибирск: Наука, 2011. 272 с.
5. Соловьянова И. П., Шабунин С. Н. Теория волновых процессов. Акустические волны. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. 142 с.
6. Карандаев А. С., Евдокимов С. А., Сарлыбаев А. А., Леднов Р. А. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 2. С. 58–68.
7. Пат. 2370784 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Способ определения места локализации и вида дефектов в активной части электрической машины, находящейся в рабочем режиме / Аксенов Ю. П., Прошлецов А. П. № 2008108297/28; заявл. 05.03.08; опубл. 20.10.09.
8. Taha I. B. M., Dessouky S., Ghaly R. [et al.] Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 6 (59). P. 4759–4769. DOI: 10.1016/j.aej.2020.08.041.
9. Волчанина М. А., Кузнецов А. А., Горлов А. В. Повышение достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4 (53). С. 33–38. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38.
10. Черемисин В. Т., Кузнецов А. А., Волчанина М. А., Горлов А. В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6, № 4. С. 161–171. DOI: 10.17816/transsyst202064161-171.

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

ORCID: 0000-0002-1815-4679

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: kuznetsova.omgups@gmail.com

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: hvv-omgups@mail.ru

ВОЛЧАНИНА Мария Андреевна, аспирантка кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 2130-4637

AuthorID (РИНЦ): 1073475

ORCID: 0000-0003-3757-5580

AuthorID (SCOPUS): 57282987400

Адрес для переписки: kuznetcova994@gmail.com

Для цитирования

Кузнецов А. А., Харламов В. В., Волчанина М. А. Алгоритм диагностирования изоляции силовых трансформаторов акустическим методом в условиях изменения температуры // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 70–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-70-74.

Статья поступила в редакцию 14.04.2022 г.

© А. А. Кузнецов, В. В. Харламов, М. А. Волчанина