

УДК 621.3.048

## Влияние гидродинамического режима на растворимость воздуха в трансформаторном масле в присутствии и отсутствии сернистых соединений

Р.Р. Вилданов, В.П. Тутубалина  
ФГБОУВПО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация  
E-mail: rustrenat@rambler.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Основная проблема современных энергосистем – это продление сроков эксплуатации трансформаторного масла в оборудовании, работоспособность которого зависит от углеводородного состава масла и от концентрации воздуха, находящегося в нём.

**Материалы и методы:** Изучено влияние гидродинамического режима подачи воздуха в масла различного углеводородного состава на количество поглощённого воздуха в присутствии и отсутствии индивидуальных и нефтяных сернистых соединений.

**Результаты:** Исследовано влияние гидродинамического режима на количество поглощаемого воздуха трансформаторным маслом с различным содержанием ароматических углеводородов в присутствии и отсутствии сернистых соединений. Установлено, что поглощение воздуха маслом в идентичных условиях в присутствии индивидуальных и нефтяных сернистых соединений 0,5 % протекает медленнее, чем в их отсутствии.

**Выводы:** Установлено, что применение барботажного и конвективного способов подачи воздуха равноценно и различается только временем насыщения, как в присутствии, так и в отсутствии сернистых соединений. Данное обстоятельство позволяет уменьшить скорость старения масла, поскольку воздух относится к главным катализаторам, ускоряющим старение масла в трансформаторах.

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, концентрация воздуха в масле, гидродинамический режим, сернистые соединения, барботажный и конвективный способы подачи воздуха, режим растворения воздуха в масле.

## Influence of hydrodynamic mode on air solubility in transformer oil with or without sulphurous connections

R.R. Vildanov, V.P. Tutubalina  
Kazan state power university, Kazan, Russian Federation  
E-mail: rustrenat@rambler.ru

### Abstract

**Background:** The main problem of modern power supply systems is an extension of operation terms of transformer oil in the equipment the operability of which depends on oil hydrocarbonic composition and on air concentration in it.

**Materials and methods:** The influence of hydrodynamic mode of air supply in oils of various hydrocarbonic structure on the amount of absorbed air with or without individual and oil sulphurous connections was studied.

**Results:** The influence of hydrodynamic mode on the amount of absorbed air by transformer oil with various content of aromatic hydrocarbons with or without sulphurous connections was considered. It is found that air absorption by oil under identical conditions with 0,5 per cent of individual and oil sulphurous connections proceeds more slowly than without them.

**Conclusions:** It is established that the application of bubbling and convective ways of air supply is equivalent and differs only in saturation time, both with and without sulphurous connections. This circumstance allows to reduce the speed of oil aging as the air belongs to the main catalysts accelerating oil aging in transformers.

**Key words:** transformer oil, air concentration in oil, hydrodynamic mode, sulphurous connections, bubbling and convective ways of air supply, air solubilization in oil.

Стабильность, долговечность и ресурс работы маслонаполненного электрооборудования во многом зависит от углеводородного состава нефтяного трансформаторного масла и его влияния на растворимость воздуха в масле [1].

Масляные трансформаторы «со свободным дыханием» непосредственно сообщаются с атмосферой. Одним из основных показателей, характеризующих эксплуатационные свойства трансформаторного масла, является концентрация в нем воздуха, который инициирует процессы старения масла [1–3].

Увеличение добычи сернистых и высокосернистых нефтей способствует повышению концентрации серы в продуктах переработки нефти при различном содержании ароматических углеводородов. В этой связи представляется целесообразным изучение влияния на растворимость воздуха в трансформаторном масле содержания ароматических углеводородов, индивидуальных и нефтяных сернистых соединений.

Исследования проводились с образцами трансформаторных масел гидрокрекинга с

различным содержанием ароматических углеводородов (10,4, 8,5 и 6,2 %). Для облегчения изложения полученных экспериментальных данных были введены следующие условные обозначения для образцов: ГК1, ГК2 и ГК3 соответственно. Все исследования проводили в присутствии гетерогенного катализатора, представляющего собой смесь железа и меди, имитирующего конструкционные материалы масляных трансформаторов. Наряду с влиянием концентрации ароматических углеводородов, содержащихся в маслах ГК1, ГК2 и ГК3, было изучено влияние индивидуальных сернистых соединений (децилфенилсульфид, додецилфенилсульфид) и сернистых соединений, выделенных из трансформаторной фракции нефти с  $T_{\text{кип}} = 300\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4]. Количество сернистых соединений составляло 0,5 % от массы масла и во всех опытах оставалось постоянным [5]. Свойства сернистых соединений приведены в таблице.

Для оценки скорости поглощения воздуха маслом в основном используются МЭК (474-1974, Женева) и ГОСТ 982-80, в которых в присутствии катализаторов воздух барботирует через слой трансформаторного масла.

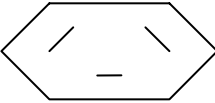
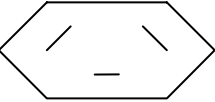
Вместе с тем в натуральных условиях контактирование воздуха с маслом осуществляется путем свободной конвекции.

Целью настоящего исследования явилось сопоставление барботажного и конвективного методов поступления воздуха в трансформаторное масло на скорость его поглощения маслом в присутствии и отсутствии сернистых соединений при различной концентрации ароматических уг-

леводородов, содержащихся в маслах ГК1, ГК2 и ГК3.

Конвективный режим растворения кислорода и воздуха в масле изучали с использованием установки, описанной в [6]. Барботажный режим создавался на этой же установке путем подачи воздуха через перфорированную трубку со скоростью 3,33 мл/с в соответствии с ГОСТ 982-80. При изучении процесса поглощения воздуха трансформаторным маслом параллельно с воздухом исследовалось поглощение кислорода маслом. Изучение процесса поглощения кислорода маслом связано с тем, что кислород, являясь чистым газом, позволяет получить точные экспериментальные результаты по скорости поглощения маслом. Далее полученные данные экспериментальных исследований были сопоставлены с результатами экспериментов, проведенных для воздуха в идентичных условиях.

Для определения концентрации растворенного в трансформаторных маслах ГК1, ГК2 и ГК3 кислорода и воздуха использовали хроматограф марки Кристаллюкс 4000М и прибор для определения растворимости вышеуказанных газов, конструкция которого и методика определения описаны в [6]. Условия проведения эксперимента следующие: температура 20 °С, время контакта масла с кислородом или воздухом 15 мин, способ ввода газов в масло – свободная конвекция. Результаты проведенного экспериментального исследования приведены на рис.1.

Сернистые соединения	C	H	S	M
Децилфенилсульфид  S-C-C <sub>9</sub> C <sub>16</sub> H <sub>26</sub> S	76,73	10,46	12,81	250,45
Додецилфенилсульфид  S-C-C <sub>11</sub> C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> S	77,63	10,86	11,51	278,504
Нефтяные сернистые соединения C <sub>n</sub> H <sub>2n-4</sub> S; n = 20	77,92	10,69	11,39	308

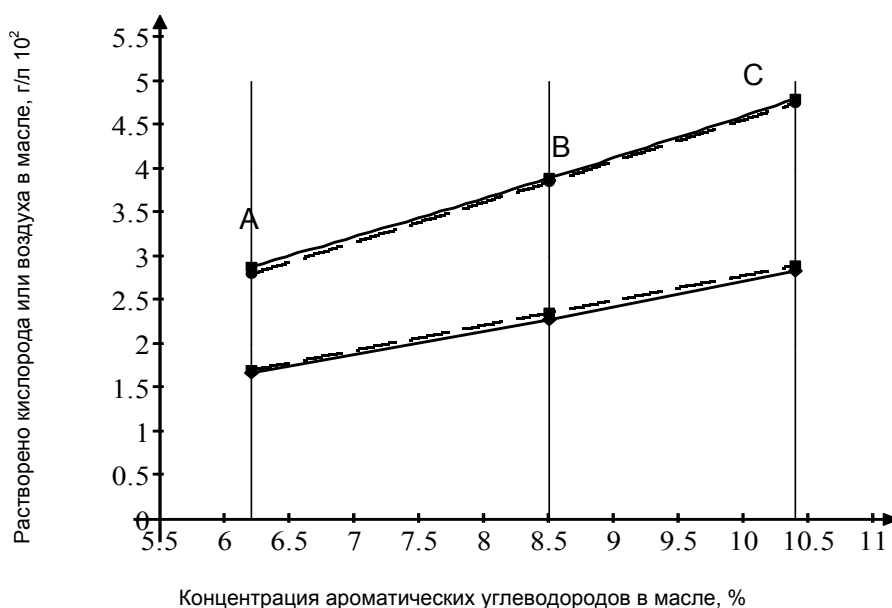


Рис. 1. Зависимость концентрации кислорода и воздуха в трансформаторном масле от его углеводородного состава:

- — количество поглощенного кислорода на установке;
- — количество поглощенного кислорода с применением газохроматографического метода;
- ◆ — количество поглощенного воздуха на установке;
- — количество поглощенного воздуха с применением газохроматографического метода

Анализ полученных результатов (рис. 1) показал наличие пропорциональной зависимости между растворимостью воздуха и растворимостью кислорода и содержанием ароматических углеводородов в маслах в области исследованных концентраций. Точки А, В и С соответствуют состоянию насыщения газами трансформаторных масел ГК3, ГК2 и ГК1.

По растворимости кислорода и воздуха, трансформаторные масла можно расположить в следующий ряд: ГК1 > ГК2 > ГК3.

Наибольшее количество кислорода и воздуха растворяется в масле ГК1 с содержанием ароматических углеводородов, равным 10,4 % и наименьшим в масле ГК3 (6,2 %).

В связи с тем, что в натуральных условиях эксплуатации масла в трансформаторах последнее контактирует только с атмосферным воздухом, следующую серию опытов проводили с использованием воздуха в присутствии и отсутствии сернистых соединений.

Настоящее исследование проводилось в целях определения предельного времени насыщения масел ГК1, ГК2 и ГК3 воздухом. Под предельным временем насыщения подразумевается достижение равновесного состояния гетероген-

ной системы трансформаторное масло–воздух. Исследования проводились при температуре 20 °С, в присутствии гетерогенного катализатора при двух гидродинамических режимах подачи воздуха в трансформаторное масло путем свободной конвекции и барботаж.

Для оценки скорости поглощения воздуха трансформаторным маслом применяется ГОСТ 982-80, в котором определение количества поглощенного воздуха проводится в барботажном режиме. Этот же метод используется и для определения скорости старения масла. Однако в натуральных условиях воздух в трансформаторное масло диффундирует в условиях свободной конвекции, процесса существенно медленного, чем в процессе барботажного режима. Поэтому для определения достоверности результатов, получаемых ГОСТируемым методом и в условиях работы масла в трансформаторах, были проведены эксперименты по определению предельного времени поглощения воздуха маслами с различным содержанием ароматических углеводородов в разных гидродинамических режимах в присутствии и отсутствии сернистых соединений.

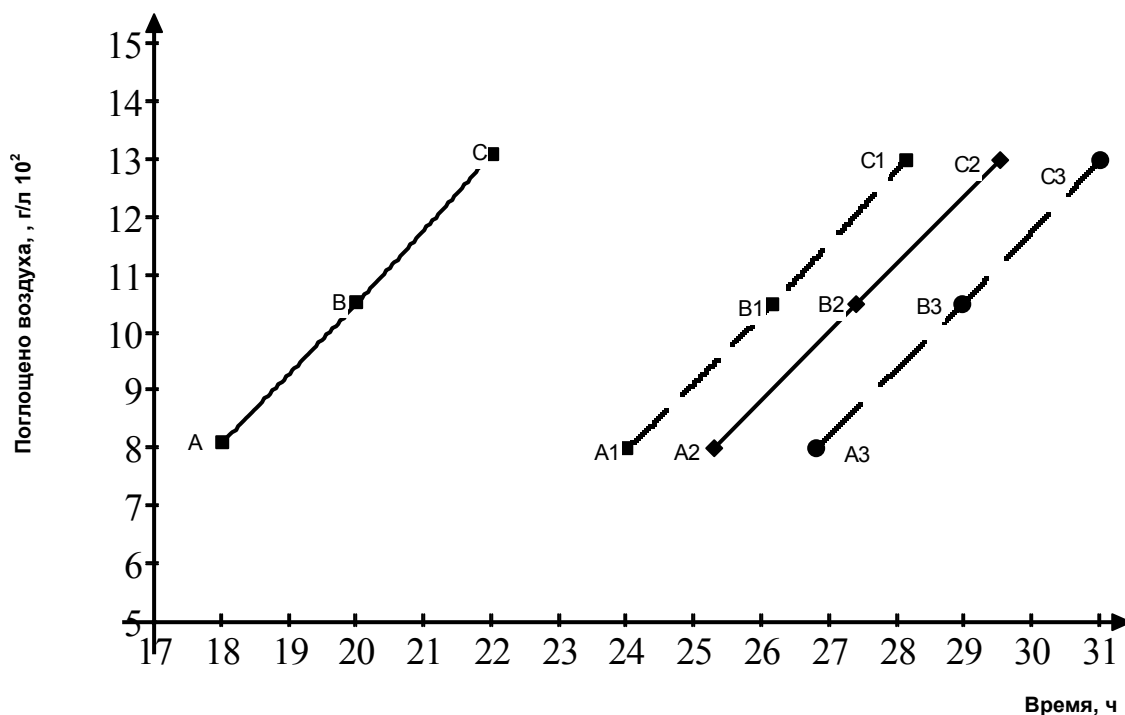


Рис. 2. Зависимость предельного времени контакта трансформаторных масел с воздухом от концентрации ароматических углеводородов при свободной конвекции:

- — предельное время насыщения для масел в отсутствие сернистых соединений;
- — предельное время насыщения для масел с децилфенилсульфидом;
- ◆ — предельное время насыщения для масел с додецилфенилсульфидом;
- — предельное время насыщения для масел с нефтяными сернистыми соединениями

Анализ зависимости концентрации поглощенного воздуха от времени контакта масла с различным содержанием ароматических углеводородов с воздухом в условиях свободной конвекции и в присутствии и отсутствии сернистых соединений (рис. 2) показывает, что предельное время контакта образцов трансформаторных масел с воздухом линейно возрастает в зависимости от концентрации ароматических углеводородов в масле. Точки А, В, С, А1, В1, С1, А2, В2, С2, А3, В3 и С3 соответствуют предельному времени насыщению масел воздухом при свободной конвекции в отсутствие и присутствии сернистых соединений. Точки А1, В1 и С1 соответствуют предельному времени насыщения в присутствии децилфенилсульфида, точки А2, В2 и С2 – в присутствии додецилфенилсульфида, точки А3, В3 и С3 – в присутствии нефтяных сернистых соединений.

В соответствии с полученными результатами (рис. 2), введение в состав трансформаторных масел ГК1, ГК2 и ГК3 индивидуальных и

нефтяных сернистых соединений приводит к увеличению предельного времени контакта масел с воздухом. Проведенные экспериментальные исследования показали, что индивидуальные и нефтяные сернистые соединения, ингибируя углеводороды масла, повышают продолжительность его контакта с воздухом до времени насыщения. Использование индивидуальных и нефтяных сернистых соединений приводит к возрастанию времени контакта масла с воздухом, что способствует улучшению качества исследованных масел.

На рис. 3 представлена зависимость концентрации поглощенного воздуха от времени контакта масел ГК1, ГК2 и ГК3 с воздухом в барботажном режиме (ГОСТ 982-80). Точки А, В, С, А1, В1, С1, А2, В2, С2, А3, В3 и С3 соответствуют предельному времени насыщения для масел ГК3, ГК2 и ГК1 соответственно в присутствии и отсутствии сернистых соединений.

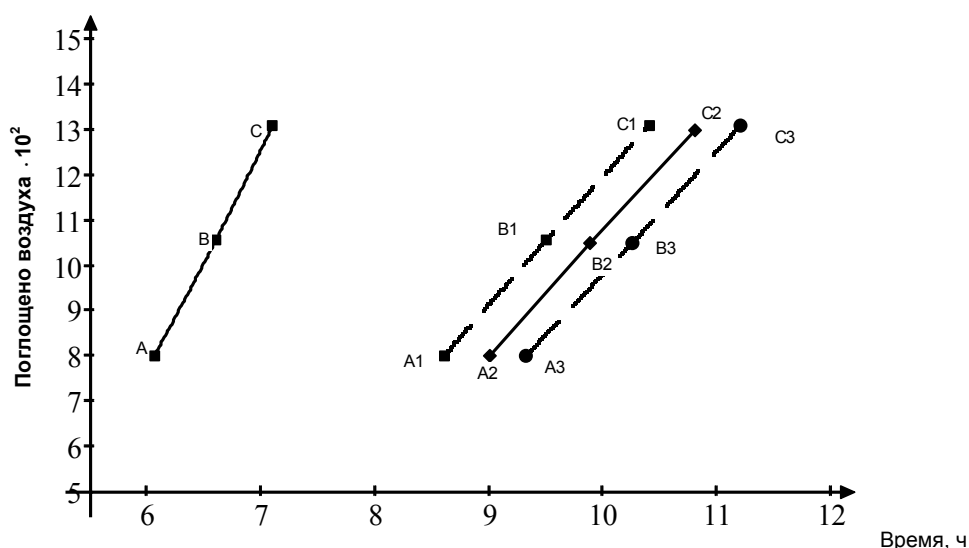


Рис. 3. Зависимость предельного времени контакта трансформаторных масел с воздухом от концентрации ароматических углеводородов при барботажном режиме:

- — предельное время насыщения для масел в отсутствие сернистых соединений;
- — предельное время насыщения для масел с децилфенилсульфидом;
- ◆ — предельное время насыщения для масел с додецилфенилсульфидом;
- — предельное время насыщения для масел с нефтяными сернистыми соединениями

В присутствии децилфенилсульфида 0,5 %, по сравнению с отсутствием этого сернистого соединения, в трансформаторном масле время контакта воздуха с маслом возрастает в 1,44 раза.

При содержании додецилфенилсульфида 0,5 % время контакта воздуха с трансформаторным маслом возрастает в 1,51 раза по сравнению с отсутствием этого сернистого соединения.

Введение в масло нефтяных сернистых соединений 0,5 % (A3, B3, C3) увеличивает предельное время насыщения воздухом в 1,56 раза по сравнению с их отсутствием в масле. Анализ полученных зависимостей (рис. 2, 3) показывает, что предельное время насыщения в барботажном режиме сокращается по сравнению с проведением процесса в условиях свободной конвекции для масел с различным содержанием ароматических углеводородов. При этом сохраняется линейная зависимость концентрации поглощенного воздуха от предельного времени его поглощения трансформаторным маслом.

В соответствии с экспериментальными данными, приведенными на рис. 2, 3, введение в состав масел ГК1, ГК2 и ГК3 индивидуальных нефтяных сернистых соединений приводит к увеличению предельного времени насыщения этих масел воздухом. Вместе с тем проведенные исследования показали, что нефтяные сернистые соединения эффективнее индивидуальных сернистых соединений в рассмотренных опытах.

Таким образом, анализ приведенных данных показывает, что индивидуальные и нефтяные сернистые соединения ингибируют процесс поглощения воздуха маслом, способствуя увеличению времени контакта масла с воздухом.

В результате сопоставления полученных экспериментальных данных установлено, что в условиях барботажного режима при отсутствии сернистых соединений предельное время насыщения составляет: для масла ГК3 – 7,1 ч; ГК2 – 6,6 ч и ГК1 – 6,06 ч. В присутствии индивидуальных и нефтяных сернистых соединений время насыщения для масла ГК3 составляет 10,4 ч, 10,8 ч и 11,2 ч; для ГК2 – 9,5 ч, 9,88 ч и 10,25 ч; для ГК1 – 8,61 ч, 9,01 ч и 9,32 ч (рис. 3). В то время как в условиях свободной конвекции при отсутствии сернистых соединений это время составляет: для ГК3 – 21,91 ч; ГК2 – 19,94 ч и ГК1 – 18,08 ч. В присутствии же индивидуальных и нефтяных сернистых соединений время насыщения для масла ГК3 составляет 28,12 ч, 29,52 ч и 31,01 ч; для ГК2 – 26,14 ч и 27,46 ч и 28,95 ч; для ГК1 – 24,04 ч, 25,3 ч и 31,02 ч соответственно (рис. 2). Абсолютная величина поглощенного воздуха, определенная в идентичных условиях в режиме барботажа и свободной конвекции, составляет одно и то же значение для масел ГК3, ГК2 и ГК1, также наблюдается одинаковый линейный характер зависимости поглощения воздуха от предельного времени насыщения масла.

На основании полученных экспериментальных данных можно утверждать, что при оценке количества поглощенного воздуха трансформаторным маслом выше названные методы равноценны с той разницей, что время достижения предельной концентрации воздуха в масле при барботажном режиме в три раза быстрее.

Экспериментальные исследования по поглощению воздуха трансформаторными маслами показали, что ГОСТ 982-80 относится к экспресс-методам определения растворимости воздуха в масле. Однако при определении других эксплуатационных характеристик масла, в частности его термостабильности, возможно получение неверных результатов, поскольку в барботажном режиме величины межфазной поверхности и ее обновление значительно выше, чем поверхность соприкосновения масла с воздухом в условиях свободной конвекции, которая присуща работе действующих трансформаторов.

#### Список литературы

1. Мимиконян Л.Г. О повреждаемости герметичных вводов трансформаторов // Энергетик. – 1998. – № 11. – С. 31–32.
2. Нормы испытания электрооборудования. Изд. 5-е. – М.: Атомиздат, 1978. – 112 с.
3. РД 34.43.105-89. Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. – М., 1989.

*Вилданов Рустем Ренатович,*  
Казанский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры тепловые электрические станции,  
телефон (843) 519-42-52,  
e-mail: rustrenat@rambler.ru

*Тутубалина Валерия Павловна,*  
Казанский государственный энергетический университет,  
доктор технических наук, профессор кафедры тепловые электрические станции,  
телефон (843) 519-42-52.

4. Вилданов Р.Р., Тутубалина В.П. Исследование углеводородного состава трансформаторного масла и его влияние на эксплуатационные свойства // Техника и технология. – 2006. – № 1. – С. 32–35.

5. Коваль А.В., Вилданов Р.Р., Тутубалина В.П. Влияние некоторых факторов на концентрацию серы в масле // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2004. – № 11–12. – С. 82–87.

6. Вилданов Р.Р., Тутубалина В.П. Установка для определения газов в трансформаторном масле // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2006. – № 9–10. – С. 105–108.

#### References

1. Mimikonjan, L.G. *Energetik*, 1998, no. 11, pp. 31–32.
2. *Normy ispytaniya elektrooborudovaniya* [Testing norms of electric devices]. Moscow, Atomizdat, 1978. 112 p.
3. RD 34.43.105-89. *Metodicheskie ukazaniya po ekspluatatsii transformatornykh masel* [Manual on transformer oil exploitation]. Moscow, 1989.
4. Vildanov, R.R., Tutubalina, V.P. *Tekhnika i tekhnologiya*, 2006, no. 1, pp. 32–35.
5. Koval', A.V., Vildanov, R.R., Tutubalina, V.P. *Izvestija vuzov. Problemy jenergetiki*, 2004, no. 11–12, pp. 82–87.
6. Vildanov, R.R., Tutubalina, V.P. *Izvestija vuzov. Problemy jenergetiki*, 2006, no. 9–10, pp. 105–108.