

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА НА РАСТЕКАТЕЛЕ ДЕГАЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Б. В. ВАНИН, канд. техн. наук, Н. Ю. СМОЛЕНСКАЯ, инж.,  
В. В. СОКОЛОВ, канд. техн. наук

(ВНИИЭ)

Для защиты масла в трансформаторах от старения кислородом и влагой воздуха применяется изоляция его от атмосферы нейтральным газом (азотом) либо малопроницаемой для газов и паров пленкой. Заливаемое в трансформатор масло должно проходить термовакuumную обработку для доведения в нем содержания влаги и воздуха до некоторого минимума. Такая обработка масла осуществляется специальными устройствами.

В процессе дегазации масла различаются две фазы.

В первой фазе под вакуумом масло вспенивается, что создает благоприятные условия для интенсивного диффузионного выхода растворенных газов и водяного пара из тонких стенок пузырьков масляной пены. Тем не менее, после оседания пены значительная часть газов и пара остается недоизвлеченной. Для воздуха это количество составляет пятую — шестую часть, а содержание водяного пара оказывается уменьшенным в два-три раза по сравнению с исходным.

Во второй фазе происходит сравнительно медленная диффузия газов из текущего слоя масла на растекателе в вакуум. Для ускорения этого процесса конструкторы дегазирующих устройств стремятся обеспечить растекание масла тонким слоем на большой площади, а также увеличить коэффициенты диффузии газов путем повышения температуры масла. Считается также, что обработка масла существенно улучшается при устремлении к нулю остаточного давления газов над слоем текущего масла. Факторов, влияющих на процесс в данной фазе, много; зависимость от них эффективности обработки (которая оценивается по конечной концентрации  $A_k$  газа в масле на выходе из камеры с растекателем) недостаточно известна, что снижает объективность конструкторских решений при разработке дегазирующих устройств.

Для выяснения принципиальных возможностей уменьшения газосодержания масла обработкой в дегазирующем устройстве желательнее теоретически проанализировать процесс дегазации масла в колонке устройства.

Колонка обычно составляется из одного или нескольких сит, наполненных элементами растекателя — кольцами Рашига. В некоторых устройствах растекателями служат вертикально расположенные листы из металла или пластмассы. Анализ сделан применительно к этому случаю для растворенного в жидкости однородного газа, подчиняющегося закону Генри, а затем распространен на общий случай смеси нескольких однородных газов и пара и невертикально расположенных элементов поверхности растекателя. Теоретическая модель процесса дана на рис. 1. Слой жидкости толщиной  $d$  стекает по полубесконечной стенке шириной  $b$ . Жидкость находится в контакте с газом, разреженным до давления  $p$ , малого по сравнению с нормальным атмосферным давлением  $p_0$ . Ордината  $y=h$  соответствует фактической высоте стенки растекателя. Принято, что течение жидкости ламинарное, что подтверждено оценкой числа Рейнольдса, которое оказалось равным нескольким сотым долям единицы. Диффузия газа вдоль потока жидкости принята пренебрежимо малой по сравнению с диффузией в поперечном направлении и с конвектным переносом газа в текущем слое. Наличие растворенного газа в жидкости практически не должно влиять на ее движение, поскольку газ имеет плотность примерно на три порядка меньшую, чем жидкость. Поэтому задачи о течении тонкого слоя вязкой жидкости по вертикальному листу и о диффузии газа из тонкого слоя текущей жидкости в вакуум можно формулировать и решать раздельно.

Решение первой из них получается интегрированием уравнения Навье-Стокса при граничных условиях, что скорость течения жидкости  $v(x)$  при  $x = d$  (на поверхности слоя) максимальна, при  $x = 0$  (у стенки) равна нулю, а давление в текущем слое жидкости постоянно и равно давлению газа в камере. В результате интегрирования получим:

$$v(\xi) = \frac{\rho g d^2}{2 \cdot \mu} \cdot (1 - \xi^2), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\mu$  — динамическая вязкость (жидкости, кг/(м·с));  $d$  — толщина слоя, м;  $x$  — абсцисса точки слоя, м;  $\xi = \left(1 - \frac{x}{d}\right)$  — абсцисса точки слоя после замены координаты.

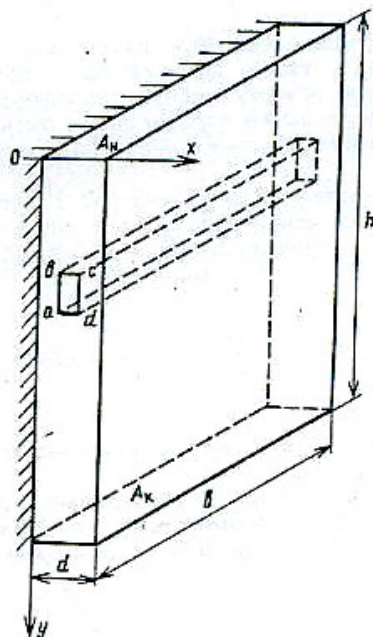


Рис. 1. Теоретическая модель течения вязкой жидкости на плоском вертикальном растекателе:

$b, h$  — ширина и высота растекателя;  
 $d$  — толщина текущего слоя жидкости.

Средняя скорость течения жидкости, м/с

$$\bar{v} = \frac{\rho \cdot g \cdot d^2}{3 \cdot \mu}. \quad (2)$$

Тогда расход жидкости, м<sup>3</sup>/с

$$q = \bar{v} \cdot b \cdot d = \frac{\rho \cdot g \cdot b \cdot d^3}{3 \cdot \mu}, \quad (3)$$

где  $b$  — ширина растекателя.

Здесь предполагается, что распределение масла по растекателю равномерно при любых расходах; это соответствовало бы конструкции растекателя с идеальным устройством для равномерного распределения потока жидкости по площади пластин независимо от толщины слоя. На таком растекателе эффект обработки жидкости был бы максимальным. Противоположным примером был бы растекатель, чье распределяющее устройство не обеспечивает смачивания жидкостью всей поверхности растекателя и где уменьшение расхода сопровождается уменьшением площади, по которой растекается поток, при стремлении толщины слоя к некоторому постоянному значению  $d_0$ . В этом случае эффективная ширина растекателя  $b_0 < b$  является функцией расхода:

$$b_0 = \frac{q}{v \cdot (d_0) \cdot d_0} = \frac{3 \cdot \mu \cdot q}{\rho \cdot g \cdot d_0^3}. \quad (4)$$

Существующие устройства представляют собой случаи, промежуточные между этими двумя предельными. Цель статьи — выяснить влияние факторов термовакuumной обработки масла на эффективность обработки применительно к первому из указанных предельных случаев, так чтобы принципиальные черты процесса дегазации не были завуалированы посторонними обстоятельствами, связанными с несовершенством конструкции распределителей.

Решение второй задачи требует интегрирования уравнения диффузии. Его нетрудно вывести, рассматривая конвекционный и диффузионный потоки через грани элементарного параллелепипеда  $abcd$  (рис. 1). Если пренебречь диффузией газа вдоль потока жидкости, для стационарного режима справедливо уравнение:

$$A_y = \frac{2 \cdot \mu \cdot D}{\rho \cdot g \cdot d^4 \cdot (1 - \xi^2)} \cdot A_{\xi\xi}, \quad (5)$$

где  $A(\xi, y)$  — концентрация газа в точке потока жидкости с координатами  $\xi, y$ ;  $D$  — коэффициент диффузии,  $m^2/c$ ;  $A_y$  — частная производная  $A$  по  $y$ ;  $A_{\xi\xi}$  — вторая частная производная  $A$  по  $\xi$ .

Решив это уравнение по способу разделения переменных при граничных условиях:  $A(0, y) = A_{11} = B_p / p_0$  (на поверхности слоя концентрация газа в жидкости устанавливается в соответствии с законом Генри;  $B$  — коэффициент Оствальда растворимости газа в данной жидкости);  $A_{\xi}(1, y) = 0$  (диффузионный поток газа через непроницаемую стенку, выражаемый согласно первому закону Фика как величина, пропорциональная градиенту концентрации, равен нулю) и вычислив конечную концентрацию  $A_K(y = h)$  как среднее значение концентрации  $\langle A(\xi, h) \rangle = \int_0^1 A(\xi, h) \cdot d \cdot \xi$ , получим с использованием (3), что

$$\frac{A_K - A_{11}}{A_H - A_{11}} = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot e^{-\varepsilon \omega_n^2 w} = u(w) \quad (6)$$

где  $A_H$  — начальная концентрация газа в жидкости, с которой она поступает на растекатель;  $\varepsilon = 2 / 3\sqrt{3}$ ;  $\omega_n$  — корни характеристического трансцендентного уравнения для (5);  $c_n$  — коэффициенты этого уравнения;  $u$  — степень недоизвлечения газа;  $w$  — безразмерный критерий

$$w = \frac{Ds}{q} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot s}{\mu \cdot q \cdot h}}; \quad (7)$$

$s = b \cdot h$  — площадь поверхности растекателя.

В табл. 1 представлены значения степени недоизвлечения газа при разных  $w$ . Из табл. 2 видно, что коэффициент  $c_1$  при первом члене ряда велик по сравнению с любым из последующих и с их алгебраической суммой. Ввиду этого правая часть (6) с погрешностью не более 6 % может быть представлена первым членом ряда при  $c_1 \approx 1$ .

Уравнения (6), (7) представляют собой основную характеристику идеального растекателя, т. е. конструктивно настолько совершенного растекателя, что в нем обеспечивается равномерное распределение растекающейся жидкости по всей поверхности. Предельно несовершенный растекатель характеризуется тем же уравнением (6) в сочетании с уравнением (8) вместо (7). Надо заметить, что табл. 1 остается верной и для этого случая, а также для любого другого, если принять во внимание фактическую толщину, ширину и площадь растекающегося слоя.

Величина  $w$  есть безразмерный критерий подобия, заменяющий собой девять параметров процесса, содержащихся в правой части (7). Она может быть выражена как

произведение двух коэффициентов:  $w_1 = s \cdot \sqrt[3]{g \cdot s / h}$  и  $w_2 = D / q \cdot \sqrt[3]{\rho / \mu \cdot q}$ . Первый из них зависит только от геометрических размеров растекателя и может быть назван его «коэффициентом конструкции», второй определяется параметрами, характеризующими режим обработки (расход масла и его параметры, зависящие от температуры масла при обработке). При испытаниях дегазирующих установок с неизвестными параметрами  $s$ ,  $h$  коэффициент  $w$  может быть определен по измеренным значениям  $A_H$ ,  $A_K$ ,  $A_{II}$  с помощью (6) и табл. 1, а по нему и по  $w_2$  найден коэффициент  $w_1$ . Установка конструктивно лучше, если для нее этот коэффициент больше.

Таблица 1

**Зависимость степени недоизвлечения газа  $u$  от безразмерного критерия  $w$**

$w$	$u$	$w$	$u$
0	0,978	0,72	0,157
0,02	0,885	0,82	0,121
0,1	0,758	0,92	$0,94 \cdot 10^{-1}$
0,18	0,623	1,22	$0,44 \cdot 10^{-1}$
0,26	0,509	1,42	$0,26 \cdot 10^{-4}$
0,34	0,415	2,22	$0,34 \cdot 10^{-2}$
0,42	0,338	2,42	$0,20 \cdot 10^{-2}$
0,52	0,262	2,82	$0,72 \cdot 10^{-3}$
0,62	0,203	6,0	$0,21 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

**Корни характеристического уравнения  $\omega_n$  и коэффициенты  $c_n$  для первых десяти членов разложения функций  $u$  в обобщенный ряд Фурье**

$n$	$\omega_n$	$c_n$
1	2,2632	0,9417
2	6,2978	$-0,5125 \cdot 10^{-1}$
3	10,3077	$0,7794 \cdot 10^{-1}$
4	14,3128	$-0,2121 \cdot 10^{-1}$
5	18,3159	$0,3033 \cdot 10^{-1}$
6	22,3181	$-0,1213 \cdot 10^{-1}$
7	26,3196	$0,1668 \cdot 10^{-1}$
8	30,3210	$-0,8055 \cdot 10^{-2}$
9	34,3220	$0,1069 \cdot 10^{-1}$
10	38,3227	$-0,5805 \cdot 10^{-2}$

Формула (6) в сочетании с (7) определяет степень недоизвлечения применительно к идеальному случаю равномерного распределения потока жидкости по поверхности растекателя, наиболее благоприятному для ее обработки, к которому следует стремиться при конструировании дегазирующего устройства. Для него оказывается, что обработка улучшается при уменьшении расхода жидкости  $q$ ; это математически выражается в увеличении  $w$  и соответствующем уменьшении  $u$  (6), (7). Противоположный, наименее благоприятный случай соответствует неполному смачиванию поверхности жидкостью, когда уменьшение ее расхода не сопровождается уменьшением толщины ее текущего слоя. Степень недоизвлечения компоненты газа и в этом случае определяется по (6), но вывод этой формулы должен быть сделан с использованием (4) вместо (3), вследствие чего вместо (7) должна иметь место формула

$$w = \frac{3\sqrt[3]{3} \cdot D \cdot \mu \cdot h \cdot \sqrt[3]{h}}{\rho \cdot g \cdot d_0^4}, \quad (8)$$

где толщина слоя  $d_0$  - приблизительно постоянная величина.

Для этого случая оказывается, что обработка при уменьшении расхода не улучшается. В существующих дегазирующих устройствах обычно имеют место случаи, промежуточные между двумя описанными здесь, — обработка при уменьшении расхода сначала улучшается, а затем улучшение прекращается, иногда даже обработка ухудшается при уменьшении расхода ниже некоторого «оптимального» значения, что обуславливается дополнительным ограничением смачивания растекателя из-за непостоянства (некоторого увеличения) толщины слоя.

Отсюда очевидно, что при проектировании дегазирующего устройства целесообразно ориентироваться на решение, наиболее приближающееся к идеальному растекателю, а для уже изготовленного устройства следует выбирать режим работы с учетом экспериментально снятой зависимости степени недоизвлечения газа от расхода масла с тем, чтобы окончательный выбор рекомендуемого расхода был не ниже «оптимального» - значения.

Для растекателя, плоскость которого расположена под углом  $\varphi$  к горизонтали, справедливы те же формулы (7), (8), однако в них следует принять  $g = g_0 \cdot \sin \varphi$ ,  $h = h_0 / \sin \varphi$ , где  $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$  — нормальное ускорение силы тяжести;  $h_0$  — разность уровней верха и низа наклонного растекателя.

Если растекатель составлен из приблизительно изогабаритных колец, можно принять, из-за примерной равновероятности в среднем углов наклона,  $\varphi \approx 45^\circ$ ,  $\sin \varphi \approx 1/\sqrt{2}$ ,  $h_0$  — суммарная высота слоев колец.

Приведенные рассуждения, сделанные по отношению к однокомпонентному газу, легко обобщаются и на случай многокомпонентного газа. Для этого достаточно учесть, что каждая компонента удовлетворяет уравнениям вида (6) с индивидуальными значениями коэффициента растворимости и диффузии, начальной, конечной и поверхностной концентраций и, соответственно, индивидуальной степенью недоизвлечения, определяемой как левая часть соответствующего уравнения (6), физический смысл которой может быть в этом случае определен как «степень недоизвлечения рассматриваемой компоненты газа до равновесного состояния». Если конечная концентрация  $A_k$  равна предельно достижимой (при бесконечно медленном стекании жидкости) концентрации  $A_{\Pi}$ , то степень недоизвлечения равна нулю, если конечная концентрация равна начальной,  $A_k = A_H$  (обработка жидкости на растекателе отсутствует), то степень недоизвлечения максимальна и равна единице. Правая часть (6) есть та же самая «степень недоизвлечения», выраженная иным способом — через физические свойства масла, его расход и геометрические характеристики растекателя.

Для какой-либо отдельной компоненты запишем согласно (6):

$$u = \frac{\beta - \alpha}{1 - \alpha}, \quad (9)$$

где

$$\alpha = A_{\Pi} / A_H, \quad \beta = A_k / A_H.$$

Коэффициент  $\beta$  характеризующий недоизвлечение газа из масла как отношение его остаточного содержания к начальному, назовем «коэффициентом недоизвлечения». Величина  $\alpha$  представляет собой минимальное значение этого коэффициента, которое может быть достигнуто лишь в предельном случае обеспечения извлечения газа до равновесного состояния, так что обычно  $0 < \alpha < \beta$ . Формула (9) выражает степень недоизвлечения и через коэффициент недоизвлечения  $\beta$  и предельное значение последнего  $\alpha$ .

Вакуумный насос, имеющий быстроту откачки  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  - откачивает из камеры рассматриваемую компоненту газа в единицу времени в количестве  $A_{\Pi}Q/B$ . В стационарном



$$m''n = \frac{rf(1-u)}{1+r(1-u)} \quad (13)$$

Координаты  $\alpha_G, \beta_G$  рабочей точки  $G$  определяются из (9), (10) как функции параметров  $u, f, r$ :

$$\beta_G = \frac{u+r(1+f)(1-u)}{1+r(1-u)}; \quad (14)$$

$$\alpha_G = \frac{r(1+f)-ru}{1+r(1-u)}. \quad (15)$$

Оптимальный выбор параметров  $u, r, f$  должен быть предметом специального рассмотрения с учетом экономических факторов. Однако, очевидно, что при каких-либо определенных данных конструкции растекателя и режима обработки, включая расход масла  $q$ , характеризуемых определенным значением параметра  $u$ , улучшение качества обработки может быть достигнуто из-за уменьшения подсоса и характеризующего его параметра  $f$  (перемещение рабочей точки из  $G$  в  $H$  на рис. 2), увеличения быстроты откачки и снижения остаточного парциального давления газа в камере (перемещение рабочей точки из  $H$  и  $M$ ), что характеризуется уменьшением параметра  $r$ . Максимальное улучшение качества обработки соответствует перемещению рабочей точки в пределе в точку  $A$ , где параметр  $r$  приобретает нулевое значение. Надо иметь тем не менее в виду, что стремление фактически приблизиться к этому идеальному условию технически нецелесообразно из-за больших затрат и незначительности достигаемого эффекта, что показано приведенным далее примерным расчетом.

При рассмотрении параметра  $r$ , характеризующего степень недоизвлечения из-за неполноты откачки камеры, следует учитывать, что снижение остаточного давления в камере не может уменьшить коэффициент недоизвлечения ниже значения  $u$ , обусловленного конструкцией и режимом работы установки. Это означает, что параметры  $r$  и  $u$  должны быть координированы: чем хуже работа растекателя (больше  $u$ ), тем менее эффективны увеличение быстроты откачки и снижение остаточного давления, т. е. тем большие значения  $r$  могут быть допущены. Нетрудно видеть [(12), (13)], что при достаточно малом  $r$  его значение приблизительно пропорционально показателю недоизвлечения  $m$ , так что снижение  $r$  и  $m$  до очень малых значений может быть технически нецелесообразно. Например, если при  $u = 0,2$  и исходном  $m = 0,05$  снизить остаточное давление путем уменьшения  $r$  в два раза, потребуется увеличение быстроты откачки вакуумнососа также в два раза, однако, коэффициент недоизвлечения  $\beta$  уменьшится всего на 2,5 %.

Аналогично при рассмотрении параметра  $f$ , характеризующего герметичность камеры, следует учитывать, что улучшение герметичности до предела, соответствующего  $f = 0$ , может уменьшить коэффициент недоизвлечения лишь на  $m''u$ , снизив его до значения  $u + m'u$ . Поэтому выбор параметра следует координировать как с параметром  $u$ , так и с параметром  $r$ , определяющим  $m'u$  [(12), (13)]. Это, в частности, значит, что для установок, рассчитанных на сравнительно большую степень недоизвлечения  $u$ , стремление улучшить работу установки путем улучшения герметизации было бы мало эффективным.

В наибольшей степени значение недоизвлечения определяет параметр  $u$  в зависимости от значений коэффициентов конструкции и режима работы. Оценим влияние последних на результаты обработки, приняв в (7)  $D = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{с}$ ,  $\mu / \rho = 25 \cdot 10^6 \text{ м}^2 / \text{с}$ , что примерно соответствует маслу с температурой 20 °С.

На рис. 3 показана зависимость коэффициентов  $w_{1,2}$  конструкции и режима для двух значений  $u$ , из которой одно определяющее влияние коэффициента конструкции. При достаточно большом значении  $w_1$  удовлетворительные значения  $u$  (примерно 0,2) достигаются при заданном расходе (например, 3 м<sup>3</sup>/ч), даже без нагрева масла выше 20 °С. Уменьшение  $w_1$  в два раза, при сохранении прочих условий неизменными, увеличивает  $u$  примерно до 0,5. Для обратного улучшения дегазации снижением  $u$  вновь до 0,2 требуется

увеличить коэффициент режима посредством снижения расхода масла либо путем повышения его температуры и, соответственно, увеличения коэффициента диффузии газа и уменьшения вязкости масла. Заметим, что снижение расхода в два раза увеличивает  $w_2$  в 2,5 раза, а уменьшение вязкости в 10 раз (что примерно соответствует повышению температуры масла от 20 до 80°C) увеличивает  $w_2$  в 2,15 раза.

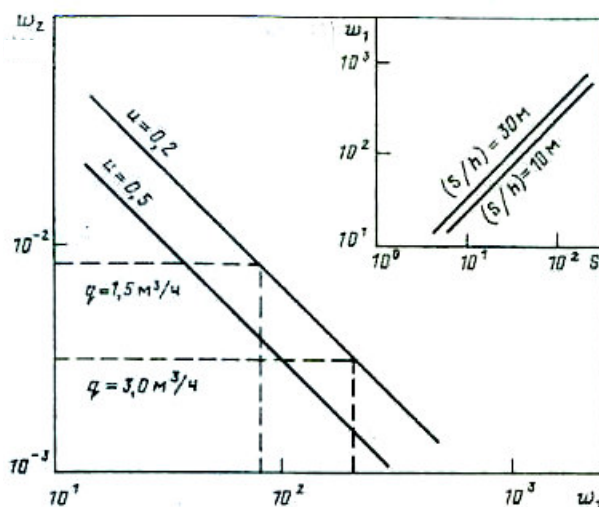


Рис. 3. Расчетные зависимости коэффициентов конструкции и режима  $w_{1,2}$  растекателя от расхода масла  $q$  и степени недоизвлечения газа  $u$

Коэффициент конструкции определяется, прежде всего, размером поверхности растекателя и, в меньшей степени, отношением  $s/h$  (рис.3). Увеличение высоты растекателя  $h$  при неизменной его поверхности снижает эффективность дегазации.

Приведенные соображения относятся к случаю, когда обеспечивается равномерное растекание масла по всей поверхности растекателя. Противоположный случай неполного смачивания растекателя маслом ведет не только к количественно, но и качественно иным результатам, что легко видеть из сравнения формул (7) и (8), определяющих зависимость степени недоизвлечения от факторов процесса дегазации для упомянутых случаев. Так, во втором случае увеличение высоты растекателя увеличивает  $w$ , уменьшая степень недоизвлечения, в противоположность первому случаю. Подобным же образом оказывается, что во втором случае степень недоизвлечения понижается для масла с большей вязкостью, в то время как в первом случае зависимость противоположная. Это может приводить к ложным истолкованиям опытов с растекателями, имеющими неудовлетворительно сконструированные приспособления для распределения потока масла.