

Структуризация биологической жидкости в условиях, характерных для процессов ГРВ

Коротков К.Г., Короткин А. И.

Важным классом объектов, исследуемых с помощью ГРВ, являются биологические жидкости. Была выдвинута гипотеза, что при газоразрядной визуализации на ГРВ изображениях проявляются особенности структурных неоднородностей, формируемых в жидкости за счет присутствия поляризуемых микрочастиц или заряженных макрокластеров. Под влиянием импульсного знакопеременного электрического поля эти частицы будут совершать прецессионные колебания [А.с. 813280/Скачков, Лавров, Коротков]. Рассмотрим поведение жидкости при наличии малых прецессий помещенного в жидкость микроцилиндра или микрошара.

Рассмотрим малые поперечные колебания вдоль оси Z (направленной перпендикулярно плоскости страницы) кругового цилиндра радиуса R в покоящейся жидкости (рис.2.11). Амплитуда колебаний $a \ll R$. Ограничения на частоту колебаний n не накладываются. Как показывают эксперименты по замеру распределений давления на поверхности кругового цилиндра при его неустановившемся движении (мгновенный разгон из состояния покоя) [Шлихтинг, 1974] заметное отклонение

эпюры давлений от симметричного распределения, характерное для идеальной жидкости, наблюдается только тогда, когда протяженность отрывной зоны от задней критической точки будет порядка радиуса цилиндра. В то же время расчеты для ламинарного режима течения показывают, что отрыв на поверхности кругового цилиндра при мгновенном разгоне возникает только тогда, когда путь, пройденный цилиндром с момента начала движения $S_0 \geq 0.351R$ (для шара $S_0 \geq 0.392R$). Поэтому, если

$$a \leq 0.35R, \quad (1)$$

то отрыва на поверхности цилиндра не возникает, и распределение давления определяется по теории идеальной жидкости в каждый момент времени соответственно мгновенной относительной скорости набегающего потока. Если цилиндр совершает поступательные движения по закону:

$$S = a \sin(nt), \quad (2)$$

то мгновенная скорость набегающего потока определяется выражением:

$$U_{\infty}(t) = \frac{ds}{dt} = an \cos(nt). \quad (3)$$

При этом скорость на поверхности цилиндра меняется, с учетом (3), по закону:

$$U(x,t) = 2U_{\infty}(t) \sin \frac{x}{R} = 2an \cos(nt) \sin \frac{x}{R}, \quad (4)$$

где x – координата, отсчитываемая вдоль поверхности цилиндра. Формулу (4) иногда удобно записывать в виде:

$$U(\varphi,t) = 2an \cos(nt) \sin \varphi, \quad (5)$$

где $\varphi = \frac{x}{R}$ – угловая координата, характеризующая положение точки на поверхности цилиндра.

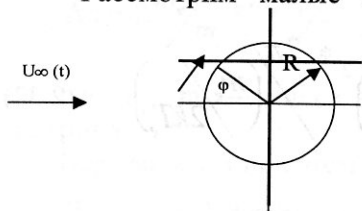


Рис.2.11. Расчетная модель

Градиент давления на поверхности цилиндра определяется соотношением:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (6)$$

где $U(x,t)$ находятся по формуле (4):

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} &= -2an^2 \sin(nt) \sin \frac{x}{R} + \frac{4a^2 n^2}{R} \cos^2(nt) \cos \frac{x}{R} \sin \frac{x}{R} = \\ &= -2an^2 \sin(nt) \sin \frac{x}{R} + \frac{2a^2 n^2}{R} \cos^2(nt) \sin \frac{2x}{R}. \end{aligned} \quad (7)$$

Осреднив по времени обе части равенств (6), (7), находим

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_{cp}}{\partial x} = \frac{a^2 n^2}{R} \sin \frac{2x}{R} = \frac{a^2 n^2}{R} \sin 2\varphi. \quad (8)$$

Проинтегрируем обе части равенства (8) по x :

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\rho} (P_{cp} - P_{0cp}) &= -\frac{R a^2 n^2}{2} \left(\cos \frac{2x}{R} - 1 \right) \quad \text{или} \\ P_{0cp} - P_{cp} &= \frac{\rho a^2 n^2}{2} \left(1 - \cos \frac{2x}{R} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Осредненное давление в критической точке $x = 0$, обозначенное в (9) через P_{0cp} , определяется осредненным значением скоростного напора $\frac{1}{2} \rho U_{cp\infty}^2(t)$, где $U_{\infty}(t)$

вычисляется по формуле (3)

$$P_{0cp} = \frac{1}{2} \rho U_{cp\infty}^2(t) = \frac{\rho a^2 n^2}{4}. \quad (10)$$

Таким образом, согласно (9), (10) получаем:

$$\begin{aligned} P_{cp} &= P_{0cp} - \frac{\rho a^2 n^2}{4} (1 - \cos \frac{2x}{R}) = \frac{\rho a^2 n^2}{4} \left[1 - 2(1 - \cos \frac{2x}{R}) \right] \quad \text{или} \\ P_{cp} \frac{\rho a^2 n^2}{4} &= 2 \cos \frac{2x}{R} - 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Распределение среднего давления по поверхности вибрирующего с малой амплитудой a и частотой n кругового цилиндра соответствует обтеканию этого цилиндра потоком идеальной жидкости вдоль направления вибрации со скоростью:

$$V_0 = an \sqrt{2}. \quad (12)$$

Необходимо, однако, обратить внимание на принципиальное отличие картины среднего течения в рассматриваемом случае (вибрирующий цилиндр) от гипотетического случая обтекания того же цилиндра с постоянной скоростью вдоль направления вибрации. В первом случае частицы жидкости с двух сторон вибрирующего цилиндра движутся в противоположных направлениях, во втором случае (обтекание цилиндра стационарным потоком) направления движения частиц жидкости с двух сторон цилиндра одинаковы.

Таким образом, задача о стационарном течении вблизи вибрирующего в неподвижной жидкости цилиндра сводится к определению поля скоростей по заданному стационарному распределению давлений вблизи кругового контура. На поверхности круга давление определяется формулой (11) что схематически иллюстрируется рис.2.12. Распределение давления в пространстве около кругового цилиндра определяется известным выражением [Шлихтинг, 1974], которое в рассматриваемом случае имеет вид

$$\frac{4}{\rho a^2 n^2} P_{cp} = 1 - (1 - 2 \frac{R^2}{r^2} \cos 2\varphi + \frac{R^4}{r^4}) = (2 \cos 2\varphi - \frac{R^2}{r^2}) \frac{R^2}{r^2}, \quad (13)$$

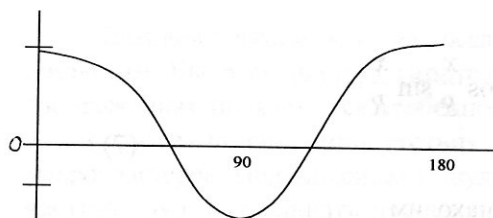


Рис.2.12. Угловая зависимость расчетного параметра

где $r \geq R$ – радиус той окружности, на которой вычисляется давление, $j = x/R$ – угол тот же, что и в формуле (5). При $r = R$ выражение (13) переходит в (11). Таким образом, задача сводится к определению медленного (по сравнению с колебательным движением) движения жидкости вблизи поверхности кругового цилиндра, когда вблизи него задано при $r \geq R$ стационарное распределение давлений (13). Течение стационарное. Уравнения Навье-Стокса в

цилиндрической системе координат [Шлихтинг, 1974] при стационарном медленном течении (пренебрегаем нелинейными слагаемыми в левой части) записываются в нашем случае бесконечного кругового цилиндра следующим образом:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right); \quad (14)$$

$$\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right); \quad (15)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (16)$$

Поскольку градиенты давления в левых частях (14), (15) заданы (давление определяется формулой (13)), то при интегрировании (14), (15) необходимо удовлетворить граничным условиям на поверхности цилиндра

$$\text{при } r = R: \quad V_r = V_\varphi = 0 \quad (17)$$

на бесконечном удалении от цилиндра

$$\text{при } r \rightarrow \infty: \quad V_r = V_\varphi = 0 \quad (18)$$

и обеспечить условие неразрывности (16).

Получим выражения для левых частей (14), (15), исходя из выражения (13):

$$\begin{aligned} \frac{P}{\rho} &= \frac{P_{cp}}{\rho} = \frac{a^2 n^2}{4} \left(2 \cos 2\varphi - \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{R^2}{r^2}; \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} &= \frac{a^2 n^2}{4} \left[\left(2 \cos 2\varphi - \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{-2R^2}{r^3} + \frac{2R^2}{r^3} \frac{R^2}{r^2} \right] = \frac{a^2 n^2}{4} \left(-\frac{4R^2}{r^3} \cos 2\varphi + \frac{4R^4}{r^5} \right) = \\ &= a^2 n^2 \frac{R^2}{r^3} \left(\frac{R^2}{r^2} - \cos 2\varphi \right); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} = \frac{a^2 n^2}{4r} \left(-4 \sin 2\varphi \cdot \frac{R^2}{r^2} \right) = -\frac{a^2 n^2 R^2}{r^3} \sin 2\varphi. \quad (20)$$

Приведем уравнения (14), (15), (16) к безразмерному виду, выбрав за характерную скорость величину $V_m = an$, а за характерный линейный размер – радиус цилиндра R . Разделив левые и правые части (14), (15) на величину $a^2 n^2 / R$, а левую часть (16) на an/R , получим в безразмерной форме уравнения (14), (15), (16) с учетом (19) и (20):

$$\frac{1}{r^3} \left(\frac{1}{r^2} - \cos 2\varphi \right) = \frac{1}{Sk} \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right) \quad (21)$$

$$-\frac{\sin 2\varphi}{r^3} = \frac{1}{Sk} \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right) \quad (22)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad (23)$$

$$\text{где } \bar{r} = \frac{r}{R}, \quad \bar{V}_r = \frac{V_r}{an}, \quad \bar{V}_\varphi = \frac{V_\varphi}{an}, \quad Sk = \frac{Ran}{\nu}. \quad (24)$$

Параметр Sk является аналогом числа Рейнольдса, однако он в себя включает, кроме характерного размера тела (R) и вязкости (ν), частоту колебаний цилиндра (n) и амплитуду этих колебаний (a).

Систему уравнений (21) – (23) перепишем, опуская черточки над безразмерными величинами, помня принятые обозначения (24):

$$Sk \frac{1}{r^3} \left(\frac{1}{r^2} - \cos 2\varphi \right) = \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right) \quad (25)$$

$$-Sk \frac{\sin 2\varphi}{r^3} = \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right) \quad (26)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad (27)$$

Выразив с помощью (27) величину $\frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi}$ через V_r :

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} \quad (28)$$

и подставив (28) в (25), получаем уравнение относительно неизвестной функции $V_r(r, \varphi)$:

$$\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{2}{r^2} V_r = Sk \frac{1}{r^3} \left(\frac{1}{r^2} - \cos 2\varphi \right)$$

или

$$\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{3}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} = Sk \frac{1}{r^3} \left(\frac{1}{r^2} - \cos 2\varphi \right). \quad (29)$$

Граничные условия для уравнения (29):

$$\text{при } r = R : V_r = 0;$$

$$\text{при } r \rightarrow \infty : V_r \rightarrow 0. \quad (30)$$

В правой части (29) имеются два слагаемых: $Sk r^{-5}$ и $Sk r^{-3} \cos 2\varphi$. При больших $r > 1$ первое слагаемое имеет порядок r^{-2} по сравнению со вторым. Решение линейного уравнения (29) должно быть периодической функцией φ . Наличие слагаемого $Sk r^{-5}$ связано с нелинейными членами уравнения движения, которыми в рассматриваемом приближении следует пренебречь. В результате задача сведется к интегрированию уравнения

$$\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{3}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} = -Sk \frac{1}{r^3} \cos 2\varphi \quad (31)$$

при граничных условиях (30).

Решение уравнения (31) ищем в форме ряда:

$$V_r(r, \varphi) = (r-1) \sum_{m=2}^{\infty} \frac{A_m(\varphi)}{r^m}, \quad (32)$$

который удовлетворяет граничным условиям (30).

Подставляя (32) в (31) и приравнявая к нулю выражения перед одинаковыми степенями r , получаем систему дифференциальных уравнений относительно неизвестных функций $A_m(\varphi)$:

$$A_2''(\varphi) = -Sk \cos 2\varphi; \quad (33)$$

$$A_3''(\varphi) + A_3(\varphi) = A_2''(\varphi) + A_2(\varphi); \quad (34)$$

$$4A_4(\varphi) + A_4''(\varphi) = 4A_3(\varphi) + A_3''(\varphi); \quad (35)$$

$$A_{m-1}''(\varphi) + (m-3)^2 A_{m-1}(\varphi) = A_{m-2}''(\varphi) + (m-3)^2 A_{m-2}(\varphi). \quad (36)$$

Интегрируя (33), получаем:

$$A_2(\varphi) = \frac{1}{4} Sk \cos 2\varphi. \quad (37)$$

Из уравнения (34) находим:

$$A_3(\varphi) = A_2(\varphi) = \frac{1}{4} Sk \cos 2\varphi, \quad (38)$$

так как общее решение однородного уравнения, соответствующего (34) должно равняться нулю, поскольку при $Sk = 0$ течение вблизи цилиндра отсутствует.

Уравнение (35) с учетом (38) дает

$$A_4''(\varphi) + 4A_4(\varphi) = 0. \quad (39)$$

Постоянные интегрирования в решении уравнения (39) должны равняться нулю по той же причине отсутствия течения при $Sk = 0$. Поэтому при $m \geq 4$ $A_m(\varphi) \equiv 0$, что следует из уравнений (36).

Таким образом:

$$V(r, \varphi) = \frac{1}{4} Sk \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r^3} \right) \cos 2\varphi. \quad (40)$$

Используя (40), можно с помощью уравнения неразрывности (28) определить составляющую скорости $V_\varphi(r, \varphi)$ при $r \geq 1$:

$$-\frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = V_r + r \frac{\partial V_r}{\partial r} = \frac{1}{4} Sk \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r^3} \right) \cos 2\varphi + \frac{1}{4} Sk \left(-\frac{1}{r} + \frac{3}{r^3} \right) \cos 2\varphi = \frac{1}{2} Sk \frac{1}{r^3} \cos 2\varphi. \quad (41)$$

Постоянная интегрирования в (41) $C_1 = 0$, поскольку при $\varphi = 0$ (направление вибрации) $V_\varphi = 0$. Следовательно:

$$V_{\varphi}(r, \varphi) = -\frac{1}{4r^3} Sk \sin 2\varphi . \quad (42)$$

Формулы (40) и (42) дают стационарную картину течения вблизи цилиндра, колеблющегося в покоящейся жидкости. Они качественно полностью воспроизводят экспериментальные результаты и данные расчетов по теории Шлихтинга. Однако, в отличие от последней, формулы (40), (42) дают возможность рассчитать распределение вызванных стационарных скоростей во всем пространстве вблизи колеблющегося цилиндра, проследив их убывание по координате r (Теория Шлихтинга дает постоянное значение V_r при $r \rightarrow \infty$).

Можно на основании полученного решения (40), (42) построить следующее приближение с удержанием в левой части первого уравнения движения:

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_{\varphi}}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_{\varphi}^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial V_{\varphi}}{\partial \varphi} \right)$$

всех нелинейных слагаемых, подставив в них полученные функции $V_r(r, \varphi)$, $V_{\varphi}(r, \varphi)$. При этом получится уравнение, аналогичное (29), только в его правой части появится дополнительное слагаемое:

$$\frac{1}{32} Sk^2 \left[\frac{1}{r^3} - \frac{3}{r^4} - \frac{3}{r^5} + \frac{6}{r^7} + \left(\frac{1}{r^3} - \frac{3}{r^4} + \frac{1}{r^5} \right) \cos 4\varphi \right] . \quad (43)$$

Как и предполагалось, при переходе от уравнения (29) к уравнению (31) нелинейные члены дают слагаемое, независящее от угла φ . Метод построения решений уточненного уравнения (31) с дополнительным членом (43) в правой части может быть использован такой же, как при нахождении решения (40), (42).

Численное моделирование, проведенное на основании полученных формул, показало, что структуризация жидкости наблюдается на значительном расстоянии от вибрирующего микрообъекта (рис.2.13). При наличии нескольких микрообъектов формируется интерференционное поле распределения потоков, закономерно зависящее от характеристик жидкости и параметров объектов. Сформированная структура определяет квазимгновенное распределение электрического поля в объеме и на поверхности объекта, влияющее на параметры ГРВ изображений.

Аналогичные расчеты были проведены для сферической частицы радиусом R , совершающей малые поступательные колебания в покоящейся жидкости вдоль оси Z сферы.

Представленные выше результаты свидетельствуют о том, что вблизи колеблющихся тел в покоящейся жидкости возникают стационарные течения. Скорости указанных течений можно рассчитать по формулам:

Круговой цилиндр радиуса R

$$V_r(r, \varphi) = \frac{1}{4} Sk \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r^3} \right) \cos 2\varphi ; \quad (44)$$

$$V_{\varphi}(r, \varphi) = -\frac{1}{4r^3} Sk \sin 2\varphi , \quad r > 1 ,$$

где φ — центральный угол, отсчитываемый от направления вибрации; r — безразмерное расстояние от центра цилиндра, отнесенное к его радиусу R ;

Сфера радиуса R

$$V_r(r, \theta) = \frac{9}{8} \frac{Sk}{r^2} \cos 2\theta ; \quad (45)$$

$$V_\theta(r, \theta) = -\frac{243}{64} \frac{Sk}{r^5} \sin 2\theta, \quad r > 1,$$

где θ — центральный угол, отсчитываемый от оси колебаний; r — безразмерное расстояние от центра сферы, отнесенное к ее радиусу R .

Параметр Sk , входящий в (44), (45), определяет безразмерный критерий подобия и выражается формулой

$$Sk = \frac{Ran}{\nu}, \quad (46)$$

в которой R — радиус цилиндра (сферы); a — амплитуда колебаний; n — частота колебаний в 1/сек; ν — кинематическая вязкость жидкости.

В связи с вопросом о перемещении частиц, находящихся в поле давлений, возникающем около вибрирующего тела, необходимо обратить внимание на следующий возможный механизм их переноса. Частица, находящаяся в той области жидкости, где имеется градиент давления в каком-либо направлении, испытывает действие обобщенной архимедовой силы, связанной с разностью давлений на ее поверхность. Под действием этой силы частица будет перемещаться в сторону убывания давления. Поэтому в случае наличия различных частиц, одни из которых под действием переменных полей совершают колебательные движения, другие (“нейтральные”) на эти поля не реагируют, в жидкости

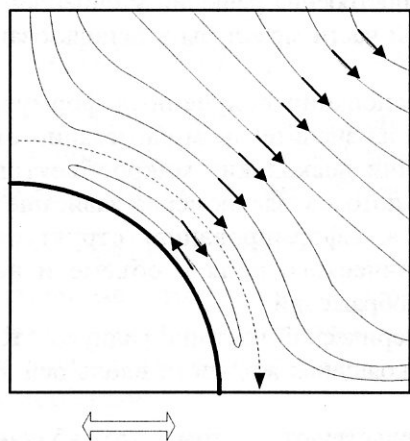


Рис. 2.13. Результаты расчета поля распределения скоростей конвекционных потоков

формируется под воздействием частиц первого рода стационарное поле давлений со своими градиентами. Под воздействием этих градиентов “нейтральные” частицы перемещаются в зоны минимальных давлений, где градиенты давления близки к нулю. Формируется, таким образом, стационарное неоднородное распределение частиц в рассматриваемом объеме жидкости. Оба рассмотренных механизма: конвективный (с помощью стационарного течения жидкости) и “Архимедов” независимы и могут существовать самостоятельно. Их объединяет основная причина — возникновение стационарного неоднородного поля давлений вблизи колеблющегося тела в покоящейся жидкости.

Полученные результаты обеспечивают концептуальную базу для обоснования наблюдаемых экспериментально неоднородностей газоразрядного свечения

жидкофазных объектов. Используемые для исследования жидкости: природная вода, кровь, моча — имеют естественные микровключения, которые поляризуются в приложенном электрическом поле, начинают прецессировать и являются источниками рассмотренных выше макронеоднородностей. В результате этого процесса жидкость из гомогенного состояния переходит в состояние объемно-неоднородного диэлектрика, и к ней применимы

рассмотренные в данной главе соображения об искажении электрического поля над поверхностью подобного диэлектрика.

Полученные результаты оказываются также полезными для концептуального понимания процесса потенцирования в гомеопатии. В результате принудительных колебаний жидкости за счет микрокластеров используемого вещества возникает квазистационарное распределение структурных течений, которое может являться одним из факторов, определяющих полезные свойства гомеопатических препаратов. Детальное рассмотрение этого вопроса является предметом отдельной работы.

Основные информативные признаки объектов, проявляющиеся при газоразрядной визуализации

Приведенный в настоящей главе материал показывает, что при ГРВ информация об объекте передается на изображение за счет его воздействия на характеристики разряда: интенсивность, длительность, частоту следования и пространственное распределение отдельных лавинных актов, а также спектральный состав излучения. В качестве основных информативных признаков биологических объектов можно выделить:

- факторы, вызывающие изменение электрического поля в разрядном зазоре (например, неоднородность структуры поверхности или объема), так как при одинаковой концентрации иницирующих частиц в областях с максимальной напряженностью электрического поля лавинные разряды возникают преимущественно и развиваются более интенсивно по сравнению с соседними областями;

- пространственную или временную неоднородность эмиссионных свойств поверхности объекта, так как от них зависят как интенсивность разрядного акта (ФЭЭ, ЭЭЭ, в определенных условиях ИЭЭ и АЭЭ), так и частота следования разрядов (ЭЭЭ);

- пространственную или временную неоднородность собственного газовыделения (или испарения) поверхности объекта, так как оно влияет на состав газовой среды в зазоре, а следовательно, на интенсивность разряда и спектральный состав излучения;

- неоднородность поверхности объекта по электропроводности или ее изменению во времени, так как от нее зависят интенсивность отдельных актов разряда и их частота следования;

- общий импеданс электрической цепи, зависящий при постоянстве прочих параметров от электрических свойств исследуемого объекта, его поверхности и объема.

Аналитические модели, развитые в настоящей главе, в совокупности с экспериментальными данными позволяют сделать следующие выводы, существенные для практической реализации метода ГРВ:

- Характер физических процессов в рамках единичного акта разряда практически не зависит от формы подаваемого напряжения, а определяется перераспределением электрического поля в разрядном зазоре благодаря накоплению поверхностного заряда на ограничивающих электродах и исследуемом объекте.

- Утвердившиеся представления о необходимости использования для формирования изображений высокочастотного синусоидального напряжения оказываются несостоятельными. Разряд может быть инициирован и, соответственно, изображения сформированы при напряжении практически любой формы: постоянном, синусоидальном, импульсном. Выбор оптимального вида напряжения в основном определяется условиями минимального влияния процесса разряда на исследуемый объект.

- Представляется оптимальным использование последовательности коротких импульсов напряжения. Так как время развития разрядного процесса составляет единицы микросекунд, то длительность импульса напряжения $T_{\text{И}}$ должна быть, по крайней мере, на порядок величины больше. Сопоставление ГРВ-грамм, полученных при различных длительностях импульсов, показало, что при $T_{\text{И}} > 15 \mu\text{с}$ и $T_{\text{И}} < 5 \mu\text{с}$ качество выявления металлических включений в диэлектрике на ГРВ-граммах ухудшается. В разрабатываемых нами приборах длительность импульса выбрана 10 мкс, что представляется оптимальным с точки зрения выявляемости структурных неоднородностей биообъекта.

- Математический анализ тепловых процессов на поверхности биообъекта в условиях ГРВ показывает, что при характерном времени воздействия 10^{-5} с даже при максимальных значениях используемых параметров выделяемой в разряде мощности оказывается недостаточно для сколько-нибудь заметного изменения температуры объекта. Это свидетельствует о невозмущающем характере процесса измерения при выбранных параметрах. В то же время их превышение на несколько порядков, например, увеличение времени измерения до единиц минут, делает тепловыделение значимым фактором и может сказаться на функционировании биообъекта.

- Анализ структуризации биологической жидкости в условиях ГРВ показывает, что в рассматриваемом объеме жидкости формируется стационарное неоднородное распределение микрочастиц. Основная причина этого явления – возникновение стационарного неоднородного поля давлений вблизи колеблющегося тела в покоящейся жидкости.

Исследование каналов извлечения информации о состоянии биологического объекта в процессе ГРВ

Особенности информационного взаимодействия БО с каналом обработки информации

Любой БО характеризуется множеством разнообразных подсистем с многообразными и подвижными связями и функциями, что приводит к большому числу возможных состояний. Состояние БО в современной медико-биологической практике описывается большим количеством разнородных параметров, каждый из которых характеризует определенный канал взаимодействия БО с окружающим пространством. Однако эти параметры описывают состояние БО неоднозначно, так как состояние равновесия, т.е. индивидуальная норма, может обеспечиваться при разных величинах определяющих параметров. Кроме того, многие параметры взаимосвязаны, причем связь эта, как правило, нелинейна. При этом важно иметь представление о физической сущности процессов, приводящих к возникновению тех или иных информационных каналов и, следовательно, тех или иных параметров.

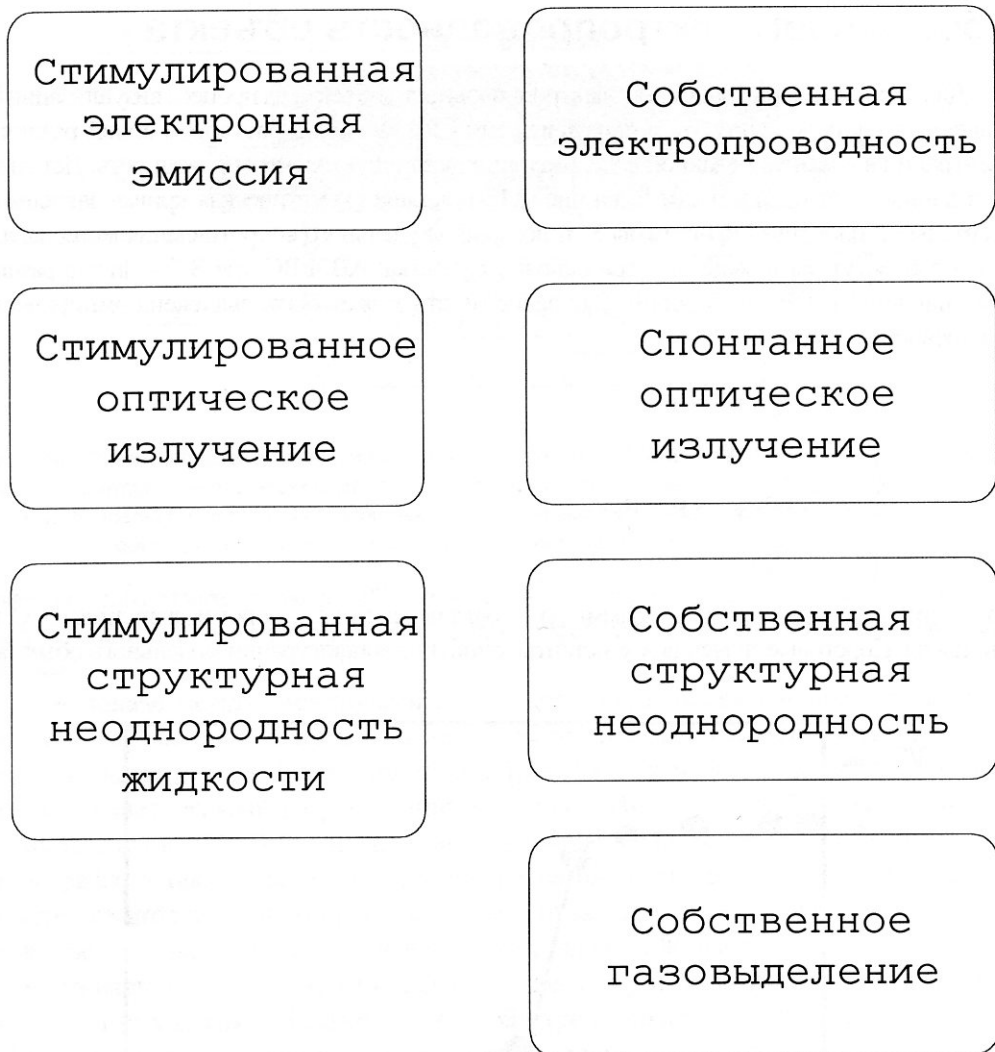


Рис.2.14. Основные информационные каналы исследования БО в методе ГРВ

На основании проведенного анализа можно выделить основные информационные каналы исследования БО в методе ГРВ, показанные на рис.2.14. Их можно условно разделить на две группы: собственные, или спонтанные, и стимулированные электромагнитным полем. К собственным относятся изменения электропроводности или импеданса объекта как единого целого и отдельных его частей, структурная неоднородность объема или поверхности, газовыделение и сверхслабое оптическое излучение. К стимулированным относятся различные виды электронной эмиссии, оптического излучения и, в случае жидкофазных объектов, структурная неоднородность за счет малой прецессии макрочастиц.

Данные каналы выделены на основании проведенного выше теоретического анализа, поэтому в настоящей главе рассмотрим ряд модельных экспериментов [Баньковский и др, 1982; 1986], подтверждающих валидность выдвинутых положений и отражающие количественные стороны процесса визуализации.

Собственная электропроводность объекта

Для оценки влияния объемной электропроводности объекта на процесс визуализации был поставлен прямой эксперимент по визуализации ГРВ свечения растворов солей различной концентрации в дистиллированной воде, имеющих различную электропроводность. Детальный анализ данных приведен в части II, на рис. 2.15 показана схематическая кривая зависимости относительной площади ГРВ-граммы S от логарифма удельного сопротивления материала. На этой кривой могут быть выделены три основных участка: AB и BC, где $S \sim -\ln r$ (с разными углами наклона) и DE где $S \sim \text{const}$. Эта зависимость может быть выражена эмпирическим соотношением:

$$S = \begin{cases} 0, & \rho < \rho_0, \\ -C_1 \ln \rho, & \rho_0 < \rho < \rho_1, \\ -C_2 \ln \rho, & \rho_1 < \rho < \rho_v, \\ S_k, & \rho > \rho_v, \end{cases}$$

где ρ_0 – порог возникновения ГРВ-граммы; ρ_1 – точка перегиба; ρ_v – порог насыщения; C_1, C_2 и S_k – константы. Пороговые значения и константы зависят от конфигурации модельного объекта.

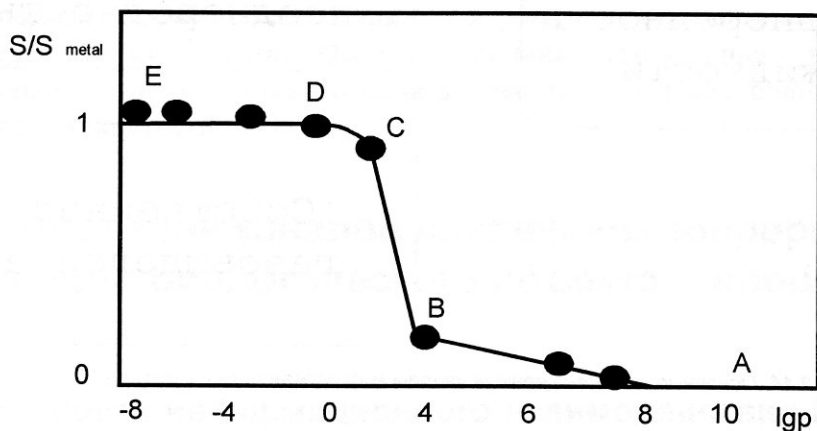


Рис.2.15. Зависимость относительной площади ГРВ-граммы жидкости от логарифма удельного сопротивления (Ом/м)

То., экспериментальные данные подтвердили приведенные соображения о многофазном характере процесса визуализации и нелинейном характере зависимости параметров ГРВ-грамм от объемной электропроводности объекта.

Для оценки влияния электропроводности поверхности объекта на процесс визуализации был поставлен прямой эксперимент на модельном объекте [Коротков, Величко, 1983]. В качестве последнего были выбраны пленки двуокиси ванадия, претерпевающие фазовый переход металл-полупроводник (ФПМП) при изменении температуры.

Схема проведения эксперимента показана на рис.2.16. Пленка двуокиси ванадия 2 нанесена на ситалловую подложку 1, приклеенную к массивной металлической пластине 3, в которую введен подогреватель 4. Температура измеряется термопарой хромель-алюмель 5. Калиброванная диэлектрическая прокладка 6 обеспечивает оптимальную величину

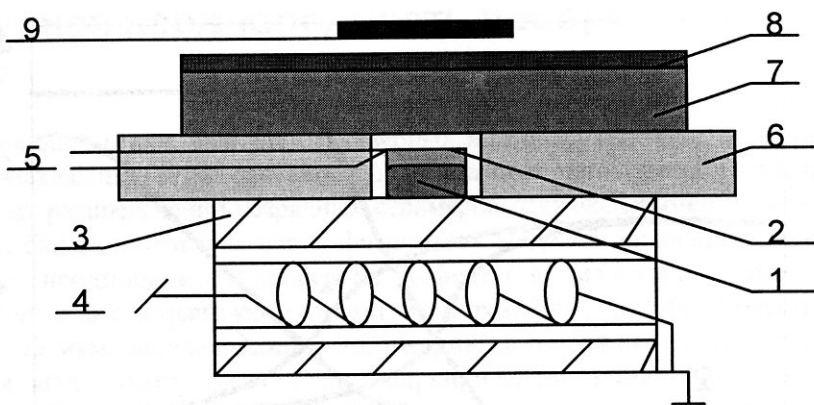


Рис.2.16. Схема проведения эксперимента по регистрации ГРВ характеристик фазовых переходов металл-полупроводник в пленках двуокиси ванадия. 1 – ситалловая подложка; 2 – пленка VO_2 ; 3 – металлическая пластина; 4 – подогреватель; 5 – термопара; 6 – калиброванная прокладка; 7 – кварцевая пластина; 8 – прозрачное токопроводящее покрытие; 9 – ФЭУ

межэлектродного зазора (порядка 300 мкм) между поверхностью исследуемого образца 2 и кварцевой пластиной 7, на наружную поверхность которой нанесено прозрачное токопроводящее покрытие 8.

При подаче между электродами 3 и 8 напряжения, превышающего напряжение зажигания (в рассматриваемых экспериментах использовалось синусоидальное напряжение частотой 400 Гц и амплитудой 1,2-2,1 кВ) в межэлектродном воздушном зазоре возникает газовый разряд лавинного типа, свечение которого регистрируется фотоумножителем (ФЭУ) 9. Сигнал с выхода ФЭУ подается на вход запоминающего осциллографа, а также после детектирования на один из входов двухкоординатного самописца, на второй вход которого поступает сигнал от термопары, пропорциональный температуре образца. Пленка двуокиси ванадия толщиной 80 нм приготавливалась путем вакуумного напыления ванадия на ситалловую подложку и последующего его окисления на воздухе. Такая пленка обладает скачком электропроводности (примерно в 15-20 раз) при фазовом переходе металл - полупроводник шириной в 17,5 К и температурным гистерезисом. Характеристики ФПМП определялись по температурным зависимостям коэффициента отражения света с длиной волны 0,63 мкм и электропроводности с использованием четырехзондового метода. На рис.2.17 кривыми 1 показана зависимость удельного сопротивления пленки VO_2 от температуры. Энергия активации электропроводности в полупроводниковой фазе вблизи перехода оказалась равной 0,23эВ.

В результате исследования трех различных образцов пленки VO_2 методом ГРВ было установлено, что фазовый переход воспроизводимо обнаруживается по температурным зависимостям интенсивности свечения (кривые 2 рис.2.17). Температурный интервал ФПМП для прямого хода петли гистерезиса равен $347,5 \pm 1,0$ К, а для обратного хода $327,5 \pm 5,0$ К. Эти значения хорошо коррелируют с данными прямых измерений, хотя область ФПМП по измерениям в газовом разряде сдвинута в сторону более высоких температур. В контрольных экспериментах, проведенных с использованием ситалловых пластин без слоя VO_2 , величина тока ФЭУ в диапазоне 290-360 К практически не зависела от температуры. Изменения интегральных характеристик свечения были обусловлены изменением параметров излучения в каждом полупериоде напряжения: с ростом температуры в процессе фазового перехода увеличивается

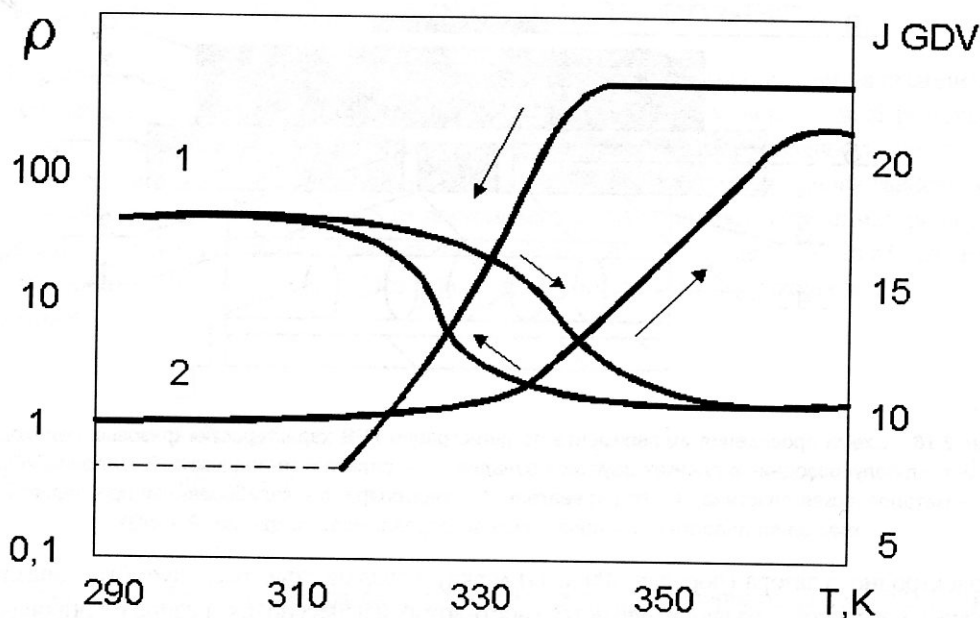


Рис. 2.17. Температурные зависимости удельного сопротивления пленки VO₂ (1) и интенсивности ГРВ свечения (2). Стрелками показаны прямой и обратный ход петли температурного гистерезиса

амплитуда, регулярность и частота следования импульсов. Особенно сильно это проявляется в полупериоды, когда на электрод δ подан отрицательный относительно заземленного электрода потенциал.

В ходе проведенного эксперимента было проверено также влияние метода ГРВ на состояние поверхности, так как бомбардировка поверхности электронами и ионами с энергией до десятков электрон-вольт может оказывать влияние на свойства поверхностного слоя. Действительно, при длительном, порядка нескольких часов, воздействии разряда на образец наблюдалось изменение параметров вплоть до исчезновения фазовых переходов, однако, если время воздействия ограничивалось периодом снятия прямого и обратного хода температурной зависимости (это время определялось скоростью нагрева и охлаждения образца, но не превышало 10 мин), изменений характеристик образца не отмечалось.

Наблюдаемое изменение характеристик разряда при ФПМП в образце, поверхность которого ограничивает разрядный промежуток, является прямым экспериментальным доказательством роли проводимости объекта в развитии разряда.

В рассматриваемом эксперименте с ростом температуры при фазовом переходе увеличивается как поверхностная, так и объемная проводимость образца, в результате чего увеличивается скорость утечки перенесенного заряда. Как показано выше, это приводит к увеличению интенсивности и частоты следования актов разряда. К такому же результату приводит увеличение скорости диффузии зарядов на заземленный электрод по боковой поверхности ситалловой пластины с ростом температуры.

Определенную роль может сыграть и перераспределение напряжения между газовым зазором и слоями диэлектрика за счет изменения диэлектрической проницаемости одного из слоев.

Структурная неоднородность поверхности и объема

Как показано выше, наличие структурных или поверхностных неоднородностей приводит к искажению электрического поля над поверхностью объекта, что может сказываться на распределении разрядных стримеров. Для экспериментальной проверки этих данных была изготовлена серия физических моделей, включавших специально подобранные неоднородности-дефекты. Дефекты в диэлектрике имитировались металлическими и диэлектрическими нитями диаметром 300, 200, 100, 30 мкм и шариками диаметром 100 мкм, заложенными в диэлектрик на разную глубину. Толщина слоя диэлектрика над этими «дефектами» варьировалась изменением числа слоев диэлектрической пленки толщиной 65 и 230 мкм, наклеиваемых друг на друга. Свечение фиксировалось на фотопленке, которая после стандартизированной обработки (проявление и фиксирование) денситометрировалась, что позволяло получить кривые пространственного распределения плотности засветки изображения (равной логарифму произведения интенсивности света, попадающего в данную точку пленки, на время экспозиции).

Полученные данные [Баньковский и др, 1982; 1986, Коротков, Хмыров, 1982] позволяют оценить предельные значения ряда визуализируемых параметров исследуемого объекта (таблица 2.1), а также характеристик получаемых ГРВ-грамм (табл 2.2).

Таблица 2.1. Предельные значения некоторых параметров объектов, выявляемых при ГРВ

Параметр	Значение
Минимальная величина выступа на металлической поверхности, мкм	3
Минимальная величина впадины на металлической поверхности, мкм	15- 20
Минимальная величина металлического включения в диэлектрике на глубине 100 мкм, мкм	10
Неоднородность диэлектрической проницаемости неметаллического объекта, %	10
Максимальная глубина (мм) залегания визуализируемого металлического включения в диэлектрике (эпоксидный компаунд) :	
шарик диаметром 100 мкм	2.5
проволока диаметром 100 мкм	4.1
пленка толщиной 0.8 мкм	0.3
Пороговое значение удельного сопротивления жидкости, отличающейся по ГРВ параметрам от дистиллированной воды, Ом/м	$< 10^7$

Таблица 2.2. Предельные значения параметров изображения, достижимые при ГРВ

Параметр	Значение
Контраст, %	40 - 100
Минимальный размер элемента разложения, мм	0.05 - 0.1
Кратность увеличения	До 100

Влажность объекта

Наличие влаги как в выделениях БО, так и в атмосферном воздухе оказывает влияние на процессы ГРВ, поэтому этот вопрос подробно рассматривался в ряде работ [Pehek et al, 1976; Нетрадиционные виды энергетики, 1989; Щевелев и др, 1998].

В работе [Чернов, 1975] исследованы процессы эмиссии электронов во влажном воздухе при атмосферном давлении. Токи эмиссии были зарегистрированы только в неоднородных электрических полях у катода, и их величина зависела от влажности воздуха. Существенно отметить, что присутствие в разряде молекул воды приводит не только к образованию двойного электрического слоя, но и вызывает протекание в разряде как прямых, так и обратных плазмохимических реакций (свыше двухсот) [Шустов, Протасевич, 1999; Протасевич, 1989; Protasevitch, 1999]. На этот процесс оказывает заметное влияние испарение в разряде воды и конденсация на заряженных частицах водяного пара. Расчеты, выполненные в предположении максвелловской функции распределения электронов по энергиям показывают, что при температуре электронов $T_e < 1,5$ эВ разложение молекул воды определяется в основном колебательным возбуждением. Это предположение согласуется с тем, что при относительной влажности воздуха порядка 100% происходит интенсивная диссоциация молекул воды с образованием гидроксила *ОН*.

Экспериментальным путем показано, что в высокочастотном разряде при относительной влажности воздуха 95-98% образуется холодная неравновесная плазма, у которой газовая температура T близка к комнатной, а температура электронов T_e не превышает 0,2 эВ (или 2000 К).

В [Григорьев, Протасевич, 1998] показано, что скорость конденсации (а затем и коагуляции) водяного пара (и капель воды) определяется квадратом напряженности электрического поля. Испарение влаги с поверхности растений или кожи человека приводит к уменьшению парциального давления водяного пара у поверхности исследуемого объекта, что приводит к перегонке влаги из более глубоко лежащих слоев на поверхность, т. е. способствует осушению поверхности объекта. Одновременно испарение влаги вызывает дополнительное охлаждение поверхности исследуемого объекта.

Таким образом, на характер разряда оказывают влияние как процессы влагообмена поверхности БО, так и объемные процессы, в основном за счет диссоциации молекул воды в газовом разряде. Кроме того, продукты разложения молекул воды влияют и на величину потенциала зажигания.

Следовательно, влажность оказывается важным, хотя и не единственным информативным признаком объекта. Как показано в работах [Jerman, Berden, Ruzic, 1996; Opalinski, 1979] и подтверждено нашими экспериментами, помещение БО (пальца, растения) в резиновую оболочку приводит к уменьшению интенсивности ГРВ-граммы, но не влияет на топографические особенности распределения стримеров. Данное утверждение подтверждается результатами, полученными с применением эвакуированных камер.

Схема проведения эксперимента приведена на рис.2.18. На оптическое окно ГРВ прибора 1 устанавливается устройство, состоящее из плоских оптических стекол 2, вакуумно плотно склеенных с зазором 1 мм. Патрубок 3 служит для откачки воздуха и напуска газов. Величина зазора была подобрана путем количественного сопоставления контраста и яркости ГРВ-граммы тест-объекта при варьировании зазора от 0.55 до 1.5 мм при обработке в ГРВ программах. Оптимальными оказались зазоры 0.8-1 мм. Давление газов поддерживалось в пределах 1000-2000 Па. Использовали воздух, азот, аргон. Разряд

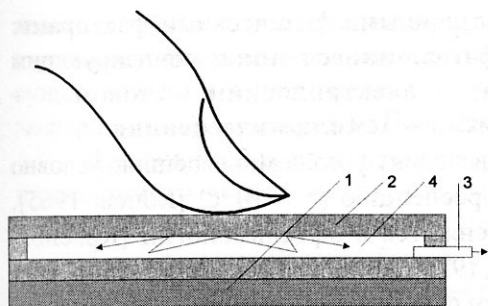


Рис.2.18. Схема проведения эксперимента с эвакуированной камерой.

- 1 -- оптическое окно ГРВ прибора;
 2 -- стеклянная камера; 3 -- патрубок для откачки воздуха и напуска газов;
 4 -- вакуумный разрядный промежуток

доказательством второстепенной роли влажности объекта при формировании ГРВ изображений, хотя это фактор необходимо учитывать как информационный признак.

развивался полностью в замкнутой полости 4, потенциалы зажигания зависели от величины давления и сорта газа в соответствии с кривой Папена.

Применение эвакуированной камеры полностью исключает физический контакт БО с областью разряда, в частности, устраняет влияние влажности объекта и окружающего атмосферного воздуха. При этом характер ГРВ-граммы качественно не меняется (хотя площадь засветки увеличивается) и основные особенности топографических неоднородностей ГРВ-грамм сохраняются. Этот результат является прямым экспериментальным

Спонтанное и стимулированное оптическое излучение в видимой и ультрафиолетовой областях спектра

Для выявления роли различных компонент оптического излучения была проведена большая серия работ по экспериментальному исследованию спектра свечения различных объектов в процессе ГРВ. Интерес к этому вопросу стимулировался многочисленными работами по эффекту Кирлиан, в которых было отмечено, что на цветных фотографиях свечения наблюдается спектр цветов, закономерно зависящих от состояния исследуемого объекта. В связи с коротким временем развития разряда исследование этого спектра представляет собой сложную техническую задачу, при решении которой были использованы оптические фильтры, спектрографы и импульсные спектрометры (рис.2.19, 2.20). Было установлено, что спектр излучения ГРВ разряда в воздухе в основном занимает область от 150 до 800 нм, наиболее активная часть спектра состоит в основном из молекулярных полос второй положительной системы азота, а также содержит линии CO, CO₂ и O₂, что обычно наблюдается в слаботочном разряде в воздушной среде. При исследовании микробиологических объектов было показано, что интенсивность большинства линий этой области зависит от состояния объекта [От эффекта, 1998]. В оптической области спектра интенсивность линий существенно ниже, их положение и амплитуда зависит от типа объекта. Применение спектральных приборов различного типа позволило убедиться, что эти линии являются излучением объекта, а не переотражением.

Таким образом, из проделанных измерений можно сделать вывод о существенной роли в процессе ГРВ оптического излучения БО в видимой и УФ области. Рассмотрим эти процессы более детально.

Практически в основе всех излучений тканей организма в видимой и ультрафиолетовой областях спектра лежит та или иная разновидность люминесценции (рис.2.21) [Казначеев, Михайлова, 1981; Конев, Волотовский, 1979; Конев, Лыскова, 1965; Merrill, Hippel, 1939; Но, Popp, Warnke, 1994; Popp, Li, Gu, 1992]. В процессе ГРВ может

возникать люминесценция, индуцированная различными физическими факторами: ультрафиолетовым и видимым излучением – **фотолюминесценция**; ионизирующим излучением – **радиолюминесценция**; электрическим током – **электролюминесценция**; химическими реакциями – **хемилюминесценция**.

В зависимости от длительности затухания свечения t фотолюминесценцию условно делят на флюоресценцию ($\tau \leq 10^{-8}$ с) и фосфоресценцию ($\tau > 10^{-8}$ с) [Конев, 1965]. Флюоресцентные методы исследования применяются в офтальмологии [Краснов, Симонова, 1971], стоматологии [Маютин, Слуцкая, 1973], онкологии [Мельник, 1968]. Кожа лица взрослого человека, облучаемая фиолетовым светом с длиной волны 400 – 410 нм, флюоресцирует красным светом. Светящиеся красные точки соответствуют устьям волосных фолликулов [Подымов, 1982].

Ультрафиолетовое излучение тканей и клеток организма лежит в области длин волн 190 – 340 нм. Его субстратом служат белки, полипептиды и углеводы, интенсивность ультрафиолетового свечения тканей составляет от 10 – 700 фотонов в 1 см^2 в секунду [Гурвич А.А., 1968, 1974; Гурвич А.Г., 1944] до 800 – 1200 фотонов в секунду [Франк, 1982]. Ультрафиолетовое излучение вызывает три основных биологических эффекта: цитопатический зеркальный [Казначеев, Михайлова, 1974, 1981, 1985; Колотилов, Бакай, 1978], некробиотический [Журавлев, 1974, 1975], эффект стимуляции клеточного деления эндогенным ультрафиолетовым излучением [Гурвич А.А., 1968, 1974; Гурвич А.Г., 1944]. Считают, что это излучение является необходимым условием митоза [Гурвич А.А., 1968; Конев, 1965; Конев, Волотовский, 1979; Конев, Лыскова, 1965; Popp, Li, Gu, 1992].

Как видно из приведенного материала, сверхслабое свечение в видимой и УФ области при определенных условиях может вносить вклад в процессы ГРВ за счет фотоионизации и инициации электронных лавин. Для выявления возможности зарегистрировать отмеченные выше эффекты при помощи метода ГРВ были исследованы образцы листовых пластин различных растений с обрезанным краем – так называемый “фантом листа”. Ножницами делался надрез листовой пластины или отрезался кончик листа длиной 3-4 мм, после чего лист или иголка сосны ставилась на электрод визуализации. Подавалось напряжение, и свечение наблюдалось на экране компьютера. Растения исследовались в двух вариантах: сорванные и на корню. Время наблюдения свечения составляло от 2 до 60 с.

Газоразрядное свечение целого листа или иголки представляло собой систему светящихся точек, расположенных по периферии листовой пластины и в области основных жилок. Как правило, яркость всех точек свечения была примерно одинакова. По мере повышения напряженности электрического поля увеличивалось количество точек свечения при незначительном увеличении яркости.

По-иному выглядело изображение при обрезании части иголки или листа. Для иголок в 3-5% исследованных образцов это свечение приобретало характер светящегося выброса, длина которого превышала длину отрезанного кончика, то есть составляла 5-7 мм. У листьев примерно в половине случаев по краю разреза возникали точки свечения, яркость которых на порядок превышала яркость “нормального” свечения. Они возникали в нескольких точках по линии разреза листовой пластины вне зависимости от того, был ли отрезан кончик листа или сделан вырез в плоскости пластины. Динамика развития свечения выглядела следующим образом: при подаче напряжения в течение 0,3-0,5с свечение не наблюдали, после чего возникали яркие стримерные каналы длиной 5-7 мм, устойчиво держащиеся в определенных точках в течение 20-40 с. Замена листа на металлическую

пластину соответствующего размера позволяла наблюдать аналогичную картину ярких стримеров, однако они возникали непосредственно после подачи напряжения и устойчиво существовали в определенных точках в течение всего времени съемки. Детали экспериментов рассмотрены в [Коротков, Кузнецов, 1997; От эффекта Кирлиан..., 1998].

Для понимания наблюдаемых эффектов необходимо обратиться к результатам проведенного в данной главе анализа. ГРВ свечение обусловлено разрядами, возникающими в точках с повышенной напряженностью электрического поля, возникающей за счет поверхностной или объемной неоднородности проводящего объекта, а также области эмиссионной активности объекта или измененной газовой среды. Неповрежденный лист растения снаружи покрыт толстым слоем эпидермальных клеток и восковой оболочкой, а внутренняя структура представляет собой систему каналов и клеточных структур, наполненных цитоплазмой, соком и смолой [Raven et al, 1986]. Таким образом, с достаточно хорошим приближением лист может быть представлен как система проводящих структур, покрытых диэлектрической оболочкой.

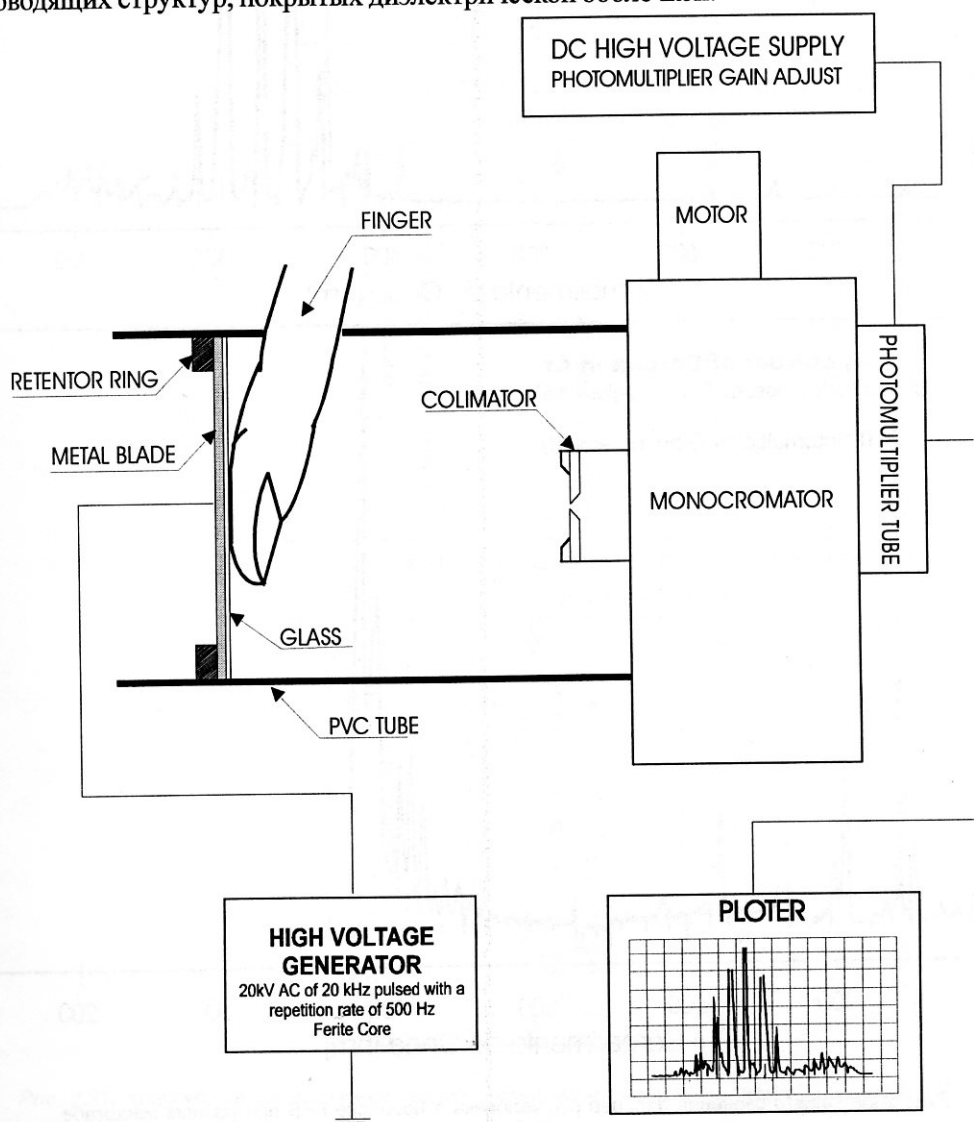


Рис. 2.19. Принципиальная схема исследования спектрального распределения ГРВ свечения БО

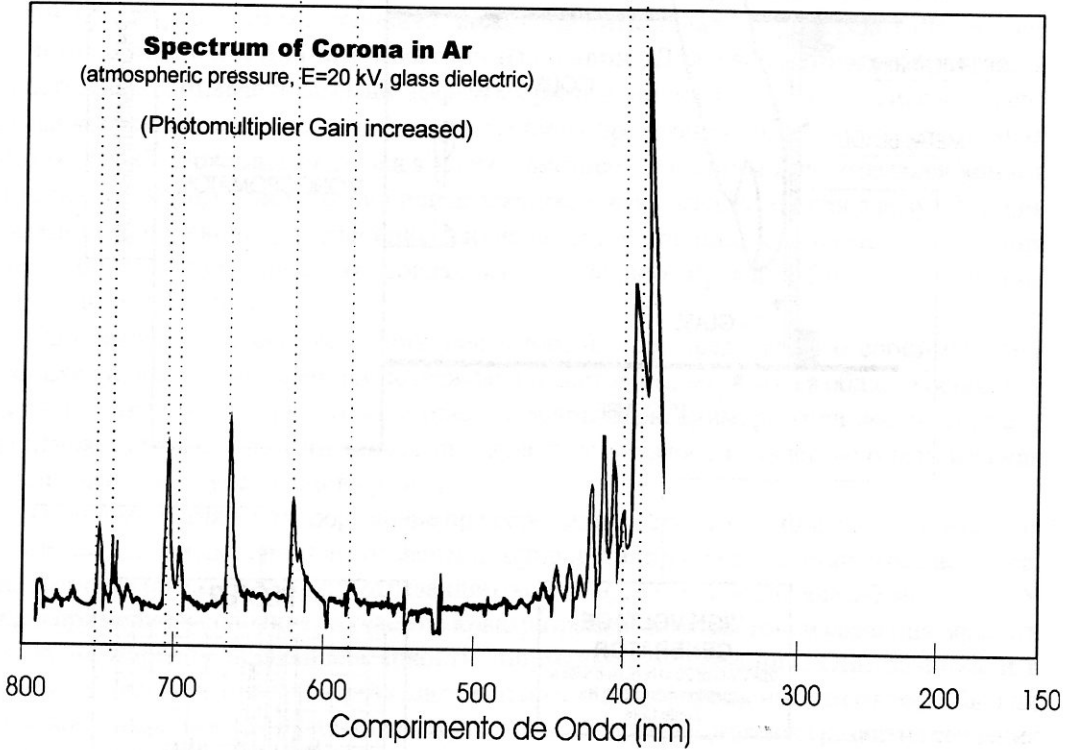
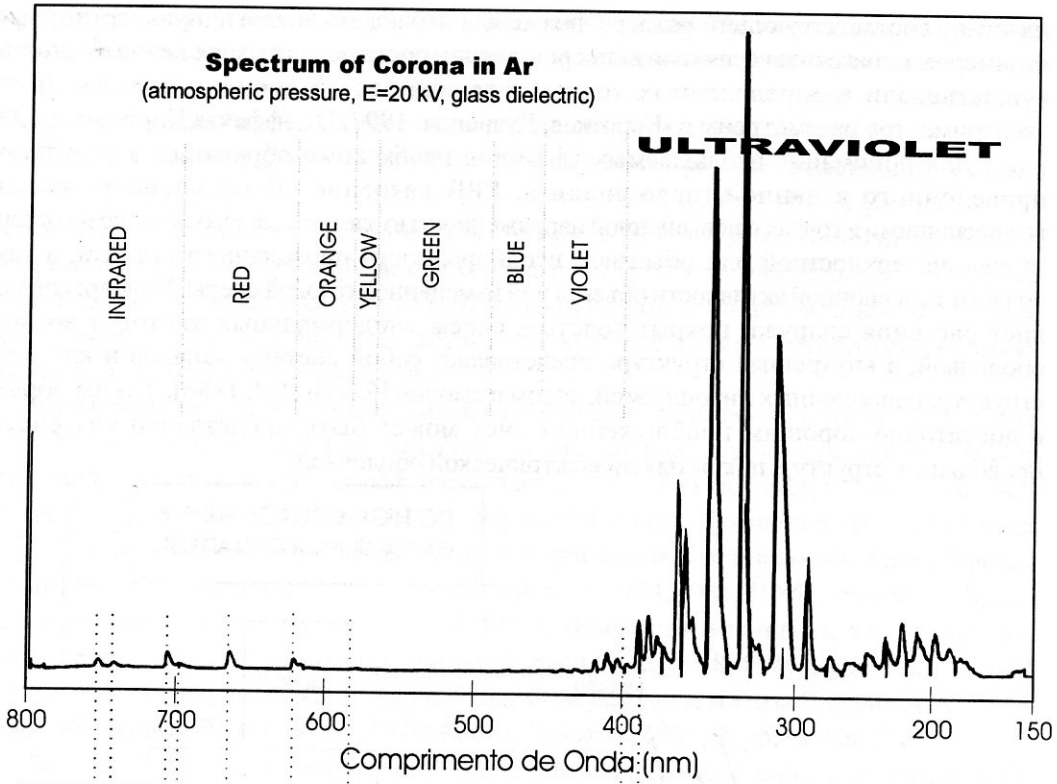


Рис. 2.20. Спектр свечения пальцев рук человека в процессе ГРВ при разном масштабе (по данным W. Pickler)

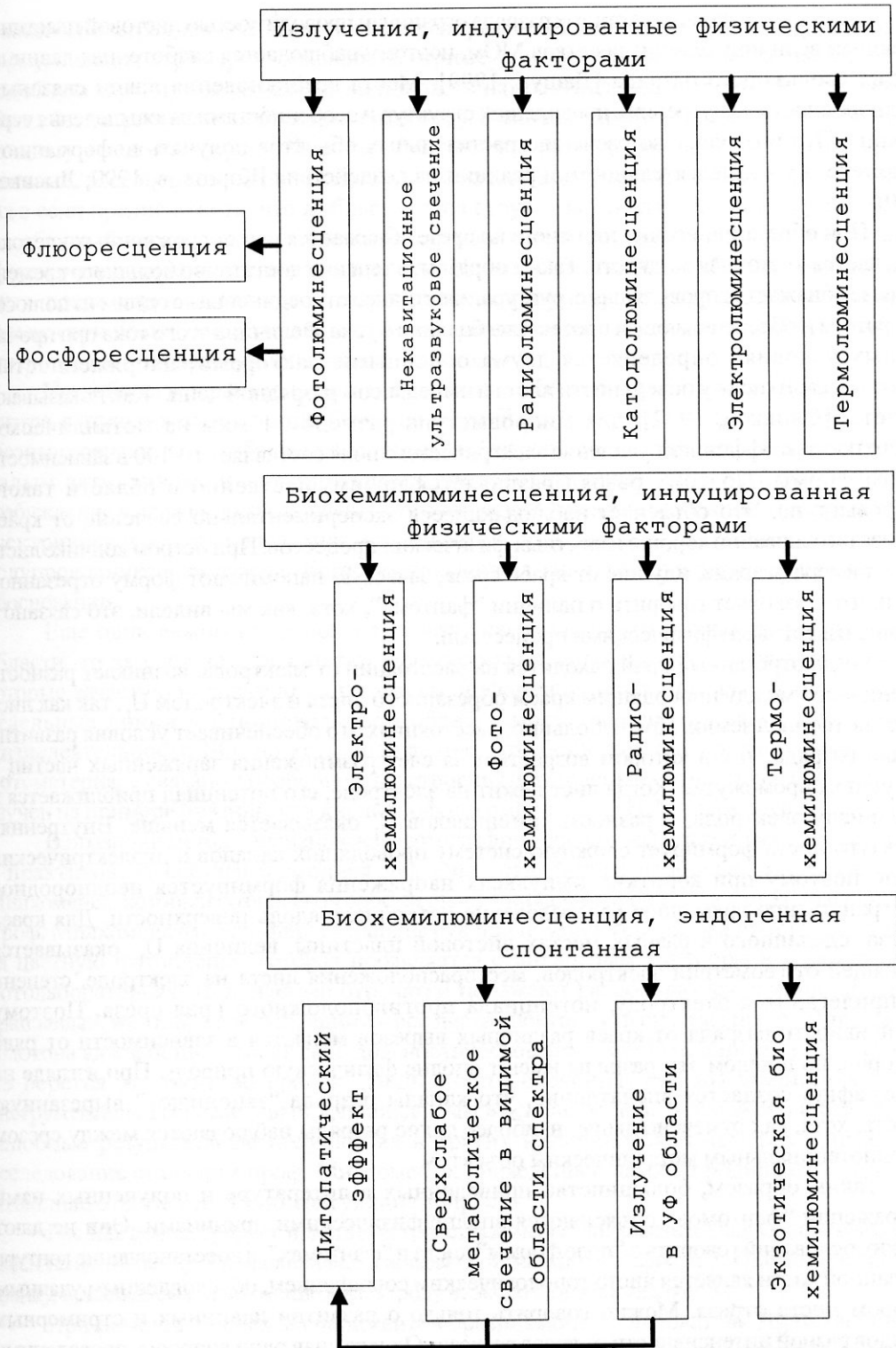


Рис. 2.21. Классификация излучений тканей организма в видимой и ультрафиолетовых областях спектра

У неповрежденного листа ток разряда ограничен проводимостью листовой пластины, имеющей величину единиц-десятков МОм, поэтому наблюдается слаботочная лавинная стадия скользящего разряда [Дашук, 1999]. Места возникновения лавин связаны с неоднородностью внутренних проводящих структур и особенностями газовой выделения через устьица. Это позволяет по свечению растительных объектов получать информацию о характере их жизнедеятельности и реакции на воздействия [Коротков, 1990; Лысыков, 1960].

При обрезании иголки или листа на срезе обнажается ряд поврежденных клеток и выделяется клеточная жидкость. Таким образом, в течение достаточно большого времени на срезе обнажается проводящая структура, электрически соединенная с одним из полюсов генератора и обеспечивающая протекание большого тока. Величина этого тока при прочих равных условиях определяется двумя основными факторами: напряженностью электрического поля у поверхности листа и импедансом разрядной цепи. Как показывают расчеты [Сливков, 1972], для микровыступа размером 1 мкм на металлической поверхности коэффициент усиления электрического поля составляет 10-100 в зависимости от его формы. Поэтому разряд развивается преимущественно в области такого микровыступа. Это объясняет наблюдающееся экспериментально свечение от краев разреза на основании хорошо известных физических процессов. При остром кончике листа два стримера разряда, идущие от краев среза, зачастую напоминают форму отрезанной части, что позволяет говорить о наличии “фантома”, хотя, как мы видели, это связано с хорошо известными физическими процессами.

Когда отрезанный край находится на расстоянии от электрода, возникает разность потенциалов между проводящим краем обрезанного листа и электродом U_L , так как лист имеет потенциал земли. При небольших расстояниях это обеспечивает условия развития канала разряда, ток в котором возрастает за счет размножения заряженных частиц в воздушном промежутке. Когда лист лежит на электроде, его потенциал приближается к потенциалу электрода, и разность потенциалов U_L оказывается меньше. Внутренняя структура листа формирует сложную систему проводящих каналов и диэлектрических слоев, поэтому при коротких импульсах напряжения формируется неоднородное пространственно-временное распределение потенциала вдоль поверхности. Для краев выреза, сделанного в разных местах листовой пластины, величина U_L оказывается зависящей от геометрии электродов, месторасположения листа на электроде, степени его прилегания к электроду, потенциала противоположного края среза. Поэтому интенсивность разряда от краев различных вырезов меняется в зависимости от ряда факторов, но в целом эти разряды имеют вполне физическую природу. При взгляде на фотографию создается впечатление, что каналы разряда “заполняют” вырезанную область, хотя, как отмечено выше, наиболее яркие разряды наблюдаются между срезом и эквипотенциальным металлическим объектом.

Таким образом, большинство приведенных в литературе и полученных нами изображений “фантомов” объясняются вполне физическими причинами. Они не дают никаких оснований говорить о “поле формы” листа и “фантамах”, а восстановление контура обрезанной части является чисто топологическим совпадением, обусловленным удачным выбором места отреза. Можно говорить только о развитии лавинных и стримерных разрядов разной интенсивности от краев разреза. Однако сняв одни вопросы, проведенные эксперименты ставят ряд новых.

Как показывают многочисленные эксперименты, свечение обрезанного кончика заземленного металлического проводника в пластиковой изоляции, полученное при прочих

равных параметрах, локализовано вблизи края среза, оно имеет характерную диффузионную форму, никаких стримеров, похожих на стримеры от сосновых иголок, не наблюдается. Подобную картину мы увидим, если положим на электрод заземленный металлический объект без острых выступов, например, монету. Возникает яркое, но равномерное свечение по всему внешнему краю. Чем же обусловлены разряды длиной 5-7 мм от срезов растений? Испарением газовой компоненты из листа их объяснить невозможно, так как даже если предположить, что выбрасывается струя газа, то благодаря диффузии облако газа будет быстро расплываться в пространстве, в то время как мы наблюдаем сформированные каналы свечения в течение 20-40 с. Отметим, что наблюдаемые выбросы очень похожи на эмиссионные дендри, развивающиеся при определенных условиях от пальцев рук целителей (эти данные рассматриваются во второй части). Не исключено, что они имеют одинаковую физическую природу.

Нами была выдвинута гипотеза о наличии собственного активного эмиссионного центра в толще живого листа. При определенных условиях это излучение является квазикогерентным, что обеспечивает его распространение на значительное расстояние с малым затуханием, и лежит в ультрафиолетовом диапазоне, что обеспечивает возбуждение выраженного канала газового разряда. Механизм генерации при протекании электрического тока через лист оказывается подобен вынужденному излучению полупроводникового лазера. Естественно, данная гипотеза нуждается в дальнейшем обосновании.

Еще один важный вопрос: если спектр свечения лежит в основном в «голубой» области, то за счет чего возникают приводимые в литературе красноватые сполохи, которые зачастую используются в качестве информационных признаков? Естественно, отдельные линии в длинноволновой области могут появляться за счет процессов жизнедеятельности БО, но есть подозрение, что большинство красных засветок на фотоматериале связано с особенностью строения фотопленки. Этот вопрос был детально изучен на примере Бразильской кирлианофотографии проф. Н. Милхоменса.

В Бразилии метод кирлиановской фотографии успешно используется сотнями врачей и практиков. И все это благодаря деятельности одного человека, проф. Ньютона Милхоменса, который создал свой собственный уникальный подход и метод диагностики. Проф. Милхоменс фотографирует пальцы рук при помощи генератора простейшего типа, на цветную фотопленку, которая проявляется стандартным способом в коммерческих фотолабораториях. Получаемые отпечатки поражают разнообразием цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, синий – все цвета спектра! И в системе проф. Милхоменса Ньютона каждый цвет имеет свое диагностическое значение [Milhomens, 1996]. Откуда же берется это буйство красок? Ведь спектр свечения, как мы убедились путем инструментальных исследований, принадлежит в основном сине-голубой области? Почему подобные результаты не получаются в других кирлиановских камерах? Детальное исследование стандарта проф. Милхоменса, проведенное нами на родине изобретателя, позволило ответить на эти интригующие вопросы.

Рис 2.22 демонстрирует принцип устройства камеры Милхоменса. Пациент прикладывает палец на фотопленку 2 и надавливает, сжимая слой мягкого материала 3. Оператор нажимает кнопку, прикладывая напряжение к электроду 4, экспозиция составляет 4 с.

При помощи точных экспериментов бразильский исследователь Вильсон Пиклер обнаружил, что разряд развивается как вокруг пальца, так и с обратной стороны фотоматериала в воздушной полости 5. Рис 2.23 показывает структуру фотопленки. На наружной поверхности расположен слой 1, чувствительный к голубому излучению. Фотоны разряда попадают на этот слой и создают фотоизображение. Фильтр 2 препятствует

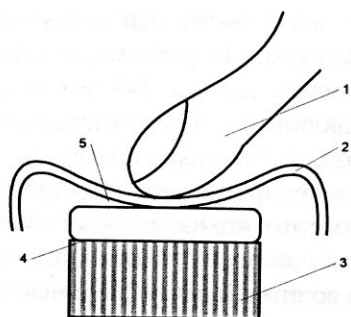


Рис. 2.22. Камера Милхомена: 1 - объект исследования; 2 - фотопленка; 3 - мягкий диэлектрик; 4 - электрод; 5 - воздушный зазор

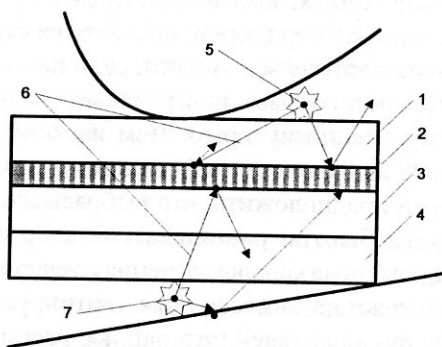


Рис. 2.23. Распределение электрического поля в системе: 1 - синий слой; 2 - фильтр; 3 - красный слой; 4 - противоореальный слой; 5 - основной заряд; 6 - фотоны; 7 - вторичный заряд

проникновению фотонов с длиной волны менее 500 нм к нижнему слою 3, создающему красную засветку. Когда фотопленка плотно прижата к электроду камеры Милхомена, все цвета, кроме сине-голубого, пропадают. При возникновении разряда с обратной стороны фотопленки фотоны, как прямые так и отраженные от подложки, попадают на “красный”

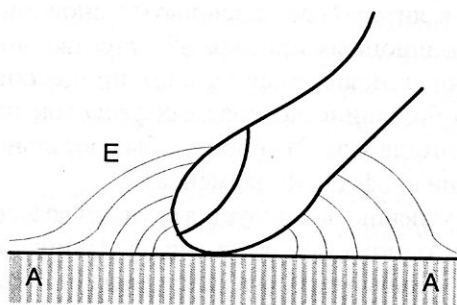


Рис. 2.24. Структура фотопленки

слою 3. Большинство этих фотонов поглощаются противоореальным слоем 4, поэтому для заметной красной засветки требуются существенные экспозиции – 4 с. При меньших экспозициях красный цвет исчезает. И все это получается только на одном определенном типе фотопленки, что, по-видимому, определяется соотношением толщин эмульсионных слоев.

Следовательно, в камере Милхомена нет “красных” фотонов – вся засветка происходит за счет синих!

Как же цвета соответствуют состоянию пациента? Электроны и ионы не могут проникнуть через фотопленку, поэтому на обратной стороне остаются только фотоны. На рис. 2.24 схематически показано распределение электрического поля в системе. Очевидно, что присутствие пальца создает специфическое распределение поля вблизи поверхности АА, зависящее от свойств пальца. В каждой точке интенсивность разряда определяется величиной поля и, следовательно, зависит от параметров участков пальца. Поэтому естественно, что засветка фотопленки связана с состоянием здоровья пациента.

Путем длительных эмпирических исследований проф. Милхоменс выявил связь цветов и геометрических особенностей изображений с состоянием пациентов. Метод получил широкое распространение и определенные клинические подтверждения в Бразилии [Filho 1987, Coutinho 1989, Auri Silveira da Silva 1987].

Выбор наиболее информативного спектрального диапазона излучения для извлечения информации о состоянии БО в процессе ГРВ

Одним из основных вопросов построения систем ГРВ является выбор наиболее информативного спектрального диапазона излучения, так как от этого зависит построение оптических схем устройств.

Для решения этого вопроса на окно ГРВ камеры накладывались стеклянные пластины с нанесенными покрытиями, преобразующими УФ часть излучения в видимый или эвакуированный экран, рассмотренный выше, с покрытиями. В качестве покрытий были использованы:

1. Люминофор К73, нанесенный поливом из шликера на воде с сушкой и спеканием при $T = 580^\circ$.
2. Поверхностно-лавинный умножитель (ПЛУ) в виде регулярной сетки дискретных фигур специальной формы и ориентации, сформированный магнетронно-вакуумным напылением алюминия и фотолитографией.
3. ПЛУ с К73.
4. Эвакуированный экран со слоем телевизионной слюды.
5. Эвакуированный экран со слоем магнитомягкого феррита (порошок феррита смешан с порошком легкоплавкого стекла в отношении 1:1, шликер на скипидаре нанесен на стекло поливом, высушен и спечен при $T = 590^\circ$).
6. Эвакуированный экран со слоем кремния (поликремний толщиной 1 мкм напылен на стекло магнетронно-вакуумным распылением кремниевой мишени в среде аргона).

Отмеченные покрытия осуществляют преобразование излучения из диапазона 250-400 нм в видимый диапазон. Для исследования влияния регистрации различных спектральных диапазонов проведено сопоставление параметров снятых в разных условиях ГРВ-грамм тест-объекта, дистиллированной воды, 0.9 и 0.45% растворов NaCl, а также биологических жидкостей (моча здоровых людей разного возраста и пола).

Проведенные исследования показали, что введение различных покрытий приводит к увеличению яркости излучения на 10-17%, однако соотношение между параметрами различных объектов остается практически постоянным. Это свидетельствует о том, что излучение в спектральном диапазоне 250-400 нм, обусловленное второй положительной системой азота, не несет информации, специфической для БО. Этот вывод подтверждается результатами исследования микробиологических культур, приведенными в [От эффекта..., 1998]. Таким образом, для построения систем визуализации может быть использована обычная стеклянная оптика и стандартные телевизионные систем.