

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОФЛОТУАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОДАМИ НА КВАЗИУПРУГИХ СВЯЗЯХ

На основе гидродинамической модели двухфазного потока представлено математическое описание и выполнен расчет электродного блока электрофлотаустановки с электродами на квазиупругих связях. Полученные расчетные формулы позволяют определять энергетические параметры ЭФУ по известному газосодержанию и периоду колебаний электродов в объеме стока как в виде зависимости, так и в виде постоянного значения.

Среди ресурсных и экологических проблем в постиндустриальном обществе одной из наиболее сложных и трудноразрешимых является проблема сохранения водных и наземных экосистем. За последние годы в России наряду с уменьшением количества промышленных сточных вод возникает тенденция ухудшения качества их очистки. Так, в Оренбургской области, по данным Госкомстата [1], до нормы очищается всего 0,01%, в Самарском регионе – не более 0,04% сбрасываемых сточных вод, при том, что в природных водоемах содержание таких соединений, как фенол, фосфор, нефтепродукты и др., уже в несколько раз превышает ПДК. Технические решения, применяемые в настоящее время на очистных сооружениях промпредприятий, не обеспечивают в должной мере очистку сточных вод перед сбросом их в горколлектор, что приводит к увеличению нагрузки на городские очистные сооружения и к ухудшению их работы.

Известно, что эффективность очистки различных категорий сточных вод от поли-

дисперсных и коллоидных примесей может быть достигнута применением электрофлотационных методов очистки [2]. Следует отметить, что интервал энергетических параметров процесса очистки достаточно многообразен и колеблется в пределах от 1 до 100 А/м² по плотности тока и от 1,5 до 30 В/см² по напряженности поля на электродах [3].

Вот почему при разработке конструктивных элементов электродного блока электрофлотаустановок (ЭФУ) большое внимание уделяется техническим решениям, позволяющим интенсифицировать процесс очистки с одновременным снижением удельных энергозатрат. В этой связи нами предложена [4] конструкция ЭФУ проточного типа с размещенными в электродном блоке электродами на квазиупругих связях с максимально развитой поверхностью и исследована его работа [5]. Назначение электродного блока заключается в том, чтобы обеспечить в объеме стока заданное газосодержание.

На рис. 1 представлена расчетная схема ЭФУ с электродами на квазиупругих связях. В предложенной схеме использованы диафрагмы, позволяющие концентрировать плотность тока и получать высокую интенсивность газовыделения на электродах.

Колебания электродов, с одной стороны, обусловлены квазиупругими связями (например, это могут быть эластичные жгуты), с другой стороны – обтеканием электродов потоком жидкости. Колебания электродов следует рассматривать как положительное качество установки, так как они приводят к вынужденному отрыву пузырьков электролизных газов с малым отрывным радиусом (менее 25 мкм). В свою очередь, активность пузырьков повышается с уменьшением от-

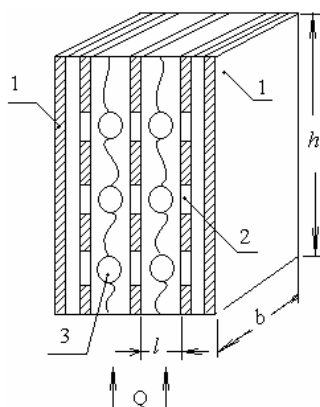


Рисунок 1. Расчетная схема ЭФУ с электродами на квазиупругих связях. 1 – основные электроды; 2 – перфорации; 3 – электроды на квазиупругих связях

рывного радиуса. В установках с плоскопараллельными электродами не удается получить пузырьки электролизных газов с отрывным радиусом менее 25 мкм [3]. Использование же эффекта инерционных сил позволяет получить пузырьки газа с диаметром менее 25 мкм [4].

Рассмотрим условие отрыва пузырька с поверхности электрода. Основными силами, формирующими равновесие пузырька, являются:

– сила поверхностного натяжения, равная:

$$F_{\text{пн}} = \sigma \pi d,$$

где d – диаметр микронеровности, на которой зарождается и растет пузырек;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

– сила сопротивления обтеканию сферы, стремящаяся оторвать пузырек, в общем случае равная:

$$F_c = \frac{\pi d_0^2}{4} \zeta \frac{\rho v^2}{2}$$

где d_0 – отрывной диаметр пузырька;

ζ – коэффициент сопротивления обтеканию сферы;

ρ – плотность однофазной жидкости;

v – относительная скорость обтекания.

Кроме того, на пузырек будет действовать сила инерции присоединенных масс, равная:

$$F_i = \frac{2}{3} \pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^3 \rho \frac{dv}{dt}.$$

Пренебрегая массой газа в пузырьках, уравнение динамики с учетом вышеизложенного представим в виде:

$$\sigma \pi d = \frac{\pi}{4} d_0^2 \zeta \frac{\rho v^2}{2} + \frac{2}{3} \pi \frac{d_0^3}{8} \rho \frac{dv}{dt}. \quad (1)$$

Положим, что скорость относительно движения изменяется по периодическому закону:

$$v = V - U = V - (A \sin \omega t)$$

$$v = V - U = V - A \omega \cos \omega t \quad (2)$$

$$v = V (1 - A \omega / V \cos \omega t), \quad (3)$$

где v – скорость потока жидкости;

A – амплитуда колебания электрода;

ω – частота колебания.

Предположим также, что закон сопротивления пузырька изменяется по закону Стокса:

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\nu}{d_0 v},$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Тогда уравнение (1) можно переписать в виде:

$$\sigma \pi d = \frac{\pi}{4} \rho \frac{1}{2} V^2 \left(1 - \frac{A \omega}{V} \cos \omega t \right)^2 \frac{24 \nu d_0^2}{d_0 v \left(1 - \frac{A \omega}{V} \cos \omega t \right)} + \frac{2}{24} \pi \rho d_0^3 \left(1 - A \omega^2 \sin \omega t \right)$$

После соответствующих преобразований получим:

$$d_0^3 + \frac{12 \pi \nu \left(1 - \frac{A \omega}{V} \cos \omega t \right)}{A \omega^2 \sin \omega t} d_0 = \frac{12 \sigma \pi d}{\rho A \omega^2 \sin \omega t} \quad (4)$$

Если $A \omega^2 \gg V d_0 \nu$, то роль сил трения будет невелика, и для отрывного диаметра пузырька находим:

$$d_0^3 \cong \frac{12 \sigma \pi d}{\rho A \omega^2 \sin \omega t}; d_0 \cong \left(\frac{12 \sigma \pi d}{\rho A \omega^2 \sin \omega t} \right)^{1/3}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что увеличение частоты колебаний приводит к уменьшению отрывного радиуса (диаметра) пузырька.

Принимая во внимание, что отрыв пузырька происходит при максимальном значении силы инерции присоединенных масс, т. е. при $|\sin \omega t| = 1$, формула (5) становится расчетной:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{12 \sigma \pi d}{\rho A \omega^2}} \quad (6)$$

Для использования этой формулы в расчетах необходимо знать характерный размер микронеровности d , на которой зарождается и растет пузырек. Информация о состоянии поверхности может быть получена в результате металлографического анализа поверхности электродов.

Рассмотрим вопрос о газовыделении с электродов на квазиупругих связях.

Положим, что на подводящих электродах создана плотность тока j_0 . Это значение плотности тока может быть найдено по ве-

личине тока J через электродный блок по известному выражению [3]:

$$j_0 = J / S_3,$$

где S_3 – площадь поверхности подводящих электродов.

Плотность тока, обуславливающая газо-выделение на электроде, определяется числом перфораций N и их диаметром a [4]:

$$j_0 = 4J / N\pi a^2 \quad (7)$$

Применяя законы электролиза Фарадея к продуктам электролиза, т. е. выделяющемуся водороду и кислороду, можно записать:

$$q_{H_2} = \frac{1}{2} \mu_{H_2} \frac{j}{F}; \quad q_{O_2} = \frac{1}{2} \mu_{O_2} \frac{j}{F}, \quad (8)$$

где q_H и q_O – массовые плотности выделившихся газов.

Объемный расход этих газов находится по формулам:

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{q_{H_2}}{\rho_{H_2}^0}; \quad \dot{V}_{O_2} = \frac{q_{O_2}}{\rho_{O_2}^0}, \quad (9)$$

здесь величины $\rho_{H_2}^0$ и $\rho_{O_2}^0$ – истинные плотности водорода и кислорода (принято, что материал анода является пассивным и не подвержен анодному окислению).

Истинные плотности газов определим по уравнению газового состояния (уравнение Клайперона – Менделеева):

$$\rho_{H_2}^0 = \frac{\mu_{H_2} RT}{P}; \quad \rho_{O_2}^0 = \frac{\mu_{O_2} RT}{P}, \quad (10)$$

где P – давление окружающей среды.

Избыточным давлением, создаваемым столбом жидкости с пузырьками газов, можно пренебречь ввиду малой высоты канала электродного блока и считать, что $P = P_{ат}$ – атмосферному давлению. Если процесс очистки ведут под избыточным давлением или же вертикальные размеры ЭФУ значительные, то расчетное давление можно определить по выражению:

$$P = \int_0^H \rho^0 \alpha_2 g dh + P_0, \quad (11)$$

здесь P_0 – давление на свободной поверхности; H – заглубление, при котором определяется давление;

α_2 – объемное газосодержание в пузырьковом потоке.

Подставляя формулы (10) и (9) в уравнение (8), определим интенсивность газо-выделения с единицы поверхности электрода:

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{q_{H_2}}{\rho_{H_2}^0} = \frac{P}{\mu_{H_2} RT} \frac{1}{2} \mu_{H_2} \frac{J}{F} = \frac{1}{2} \frac{jP}{RTF}; \quad (12)$$

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{q_{O_2}}{\rho_{O_2}^0} = \frac{P}{\mu_{O_2} RT} \frac{1}{2} \mu_{O_2} \frac{J}{F} = \frac{1}{2} \frac{jP}{RTF} \quad (13)$$

Сумма этих величин представляет собой газо-выделение с единицы поверхности одного электрода:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_{H_2} + \dot{V}_{O_2} = \frac{jP}{RTF} \quad (14)$$

Со всей поверхности электрода, соответственно, будет происходить газо-выделение, равное:

$$\dot{V} = \pi D^2 \frac{jP}{RTF}$$

При выводе этой формулы мы предположили, что плотность тока в перфорации диафрагмы, определенная по формуле (7), равна плотности тока на поверхности электрода.

Заменим в полученном выражении величину j по уравнению (7) и получим:

$$\dot{V} = 4 \frac{JP}{RTF_a} \left(\frac{D}{a} \right)^2 \frac{1}{N}$$

В дальнейшем считаем, что пузырьки газа перемещаются в жидкости без опережения или же без отставания, т. е. скорость пузырьков равна скорости несущего потока, следовательно, уравнение неразрывности можно представить в виде (расчет выполняем для одного электродного блока):

$$V_0 \rho_1^0 l b = \alpha_1 \rho_1^0 l b V$$

$$\text{откуда } V = V_0 / \alpha_1 = V_0 / (1 - \alpha_2), \quad (15)$$

здесь α_1 – объемное содержание двухфазного потока (жидкость + газ);

V – скорость движения несущей фазы в любом сечении канала;

V_0 – скорость жидкой фазы;

l – ширина канала;

b – длина канала.

Пусть нам будет известен отрывной диаметр d_0 пузырьков, тогда объем одного пузырька составит:

$$\frac{4}{3} \pi R_0^3 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_0}{2} \right)^3.$$

Эти пузырьки с числовой концентрацией n в единице объема среды будут переносить объем, равный:

$$\dot{V}_n = (\sqrt[3]{n})^3 l b \frac{\pi}{6} d_0^3 V \quad (16)$$

С другой стороны, если на ширину l канала приходится M установленных электродов, то объем выделившегося на них газа будет равен (на длину b приходится l электрод):

$$\dot{V} = 4 \frac{JP}{RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{M}{N}$$

Учтем, что $N = MK$, где K – число электродов вдоль высоты канала, тогда после прохождения i -го ряда:

$$\dot{V}^i = 4 \frac{JP}{RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{i}{K} \quad (17)$$

Используя формулы (16) и (17) после их приравнивания, получим:

$$(\sqrt[3]{n})^3 l b \frac{\pi}{6} d_0^3 V = 4 \frac{JP}{RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{i}{K}$$

Заменим в этом выражении скорость несущей фазы по уравнению (15) и перепишем его в форме:

$$\sqrt[3]{n}^2 l b \frac{4}{3} \pi R_0^3 \frac{V_0}{1-\alpha_2} = 4 \frac{JP}{RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{i}{K}$$

Умножим и разделим левую часть уравнения на $\sqrt[3]{n}$ и, принимая во внимание, что $\alpha_2 = \frac{4}{3} \pi n R_0^3$, получим:

$$\frac{\alpha_2}{1-\alpha_2} l b V_0 \frac{1}{\sqrt[3]{n}} = 4 \frac{JP}{RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{i}{K}$$

Неизвестными в этом уравнении являются n – числовая концентрация пузырьков и величина газосодержания α_2 , поэтому исключим величину $\sqrt[3]{n}$ по соотношению:

$$n^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{\alpha_2}{6 \pi d_0^3}}$$

Подставляя данное выражение в предыдущую формулу, получим:

$$\frac{\alpha_2^{2/3}}{1-\alpha_2} l b V_0 \frac{d_0}{\sqrt[3]{\frac{\pi}{6}}} = 4 \frac{JP}{RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{i}{K},$$

откуда получаем уравнение для определения величины газосодержания после прохождения i -го ряда электродов:

$$\frac{\alpha_2^{2/3}}{1-\alpha_2} = 4 \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}} \frac{JP}{d_0 l b V_0 RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{i}{K} \quad (18)$$

Учтем в этой формуле, что величина

$$l b V_0 = Q,$$

где Q – расход жидкости через один канал, тогда:

$$\frac{\alpha_2^{2/3}}{1-\alpha_2} = 4 \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}} \frac{JP}{d_0 RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \frac{i}{K} \quad (19)$$

Ранее мы показали, что назначение электродного блока заключается в том, чтобы обеспечить в объеме стока заданное газосодержание, следовательно, это выражение можно использовать для определения либо необходимой величины тока через ЭФУ, либо при заданном токе – величины расхода газа через одну секцию электродного блока.

После прохождения всех рядов электродов, т. е. на выходе из электродного блока, газосодержание будет равно:

$$\frac{\alpha_2^{2/3}}{1-\alpha_2} = 4 \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}} \frac{JP}{d_0 RTF_a} \left(\frac{D}{a}\right)^2 \quad (20)$$

Формула (20), дополненная выражением (5) для отрывного диаметра, позволяет найти основные энергетические параметры электрофлотоустановки.

Неизвестной величиной в выражении (5) является частота ω колебаний i -го электрода.

Рассмотрим колебания электродов на квазиупругих связях в потоке жидкости, представляющих собой систему с двумя степенями свободы (рис. 2).

Каждый электрод испытывает воздействие следующих сил:

– силу инерции массы электрода:

$$F_{im} = m_i x_i,$$

где m_i – масса i -го электрода,

x_i – его координата;

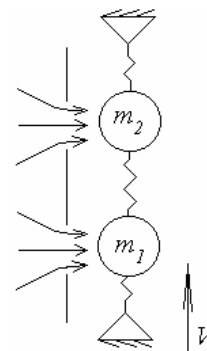


Рисунок 2. К выводу уравнения динамики электродов на квазиупругих связях

– силу инерции присоединенных масс:

$$F_{iu} = \frac{1}{2} \rho_e W_i \ddot{x}_i,$$

где $\frac{1}{2} \rho_e W_i$ – масса жидкости (присоединенная масса);

– силу сопротивления обтеканию сферического электрода:

$$F_{ci} = \frac{1}{2} \rho_e \frac{\pi D^2}{4} (v_e \pm v_3)^2 \zeta,$$

где v_3 – скорость электрода.

При движении электрода навстречу набегающему потоку сила сопротивления равна:

$$F_{ci}^+ = \frac{1}{2} \rho_e \frac{\pi D^2}{4} (v_e + v_3)^2 \zeta$$

При движении электрода по потоку сила сопротивления определится как:

$$F_{ci}^- = \frac{1}{2} \rho_e \frac{\pi D^2}{4} (v_e - v_3)^2 \zeta$$

В дальнейшем будем рассматривать случай квадратичного закона сопротивления сферы.

Кроме этих сил, на электрод также будет действовать сила тяжести, равная:

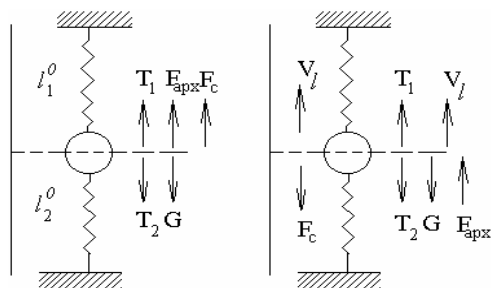
$$G = \frac{1}{2} \rho_m W g,$$

и выталкивающая сила Архимеда, равная

$$F_{арх} = \rho_e g W,$$

а также сила упругости $F_{упр} = -c \Delta x$, где c – коэффициент жесткости квазиупругой связи.

Колебания электродов под воздействием потока жидкости являются вынужденными. Роль вынуждающей силы в этом случае выполняет сила сопротивления обтеканию сферы.



а) равновесное состояние

б) $F_c > 0$, если $v_3 < v_e$
в) $F_c < 0$, если $v_3 > v_e$

Рисунок 3. К иллюстрации сил, действующих на электрод

Проанализируем вынужденные колебания единичного электрода.

На рис. 3 обозначены силы, действующие на электрод: а) в положении равновесия, б) при движении электрода вверх, в) при движении электрода вниз от положения равновесия.

При статическом равновесии имеем условие:

$$G + T_2^0 = T_1^0 + F_{арх} + F_c^0 \quad (21)$$

Если x – смещение электрода относительно положения равновесия, то

$$F_i = T_1^0 + F_{арх} + F_c^0 - G - T_2^0 - F_{im}, \quad (22)$$

где F_{im} – сила инерции присоединенных масс.

Далее имеем:

$$\rho_m W \frac{d^2 x}{dt^2} = k_1 (l_1^0 - x) - k_2 (l_2^0 + x) - \rho_m g W + \rho_e g W - \frac{1}{2} \rho_e W \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{2} \rho_e \zeta \frac{\pi D^2}{4} \{F(\dot{x})\} \quad (23)$$

где $F(x)$ – функция от скорости, которую определим ниже.

Перепишем уравнение (23), выделяя статические члены:

$$\rho_m W \frac{d^2 x}{dt^2} = T_1^0 - k_1 x - T_2^0 - k_2 x + F_{арх}^0 - G^0 - \frac{1}{2} \rho_e W \frac{d^2 x}{dt^2} + F_c^0 + \frac{1}{2} \rho_e \zeta \frac{\pi D^2}{4} F(\dot{x}) - \frac{1}{2} \rho_e \zeta \frac{\pi D^2}{4} v_e^2$$

С учетом формулы (21) получаем:

$$\rho_m W \frac{d^2 x}{dt^2} = -(k_1 + k_2) x - \frac{1}{2} \rho_e W \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{2} \rho_e \zeta \frac{\pi D^2}{4} F(\dot{x}) - \frac{1}{2} \rho_e \zeta \frac{\pi D^2}{4} v_e^2$$

где ρ_e, ρ_m – плотности материала электрода и воды;

W – объем электрода;

ζ – коэффициент сопротивления;

v_e – скорость потока жидкости относительно неподвижной системы координат.

Перенеся силы инерции присоединенных масс влево, получим

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k_1 + k_2}{\left(\rho_m + \frac{\rho_e}{2}\right) W} x = \frac{\frac{1}{2} \rho_e \zeta \frac{\pi D^2}{4}}{\left(\rho_m + \frac{\rho_e}{2}\right) W} [F(\dot{x}) - v_e^2] \quad (24)$$

Рассматривая вопрос о силах сопротивления, следует отметить два возможных (виртуальных) случая: первый – скорость движения электрода меньше скорости движения потока жидкости, т. е. $|x| < v_e$.

В этом случае при движении электрода вдоль положительного направления относительная скорость движения электрода по отношению к потоку будет отрицательной, т. е. поток будет перегонять электрод, и сила сопротивления будет направлена вдоль потока, т. е. будет положительной. В этом случае, предполагая квадратичный закон сопротивления, можно записать: $F(x) = (V_e - \dot{x})^2$ – при движении электрода от нижнего крайнего положения в верхнее крайнее, т. е. при $x > 0$.

При движении электрода навстречу потоку, т. е. из верхнего крайнего положения в нижнее крайнее ($x < 0$), силу сопротивления определим по выражению:

$$F(x) = (V_e + \dot{x})^2,$$

Таким образом, при $|x|_{\max} < V_e$ имеем:

$$F(\dot{x}) - V_e^2 = \begin{cases} V_e^2 - 2V_e\dot{x} + \dot{x}^2 - V_e^2 & \text{при } \dot{x} > 0 \\ V_e^2 + 2V_e\dot{x} + \dot{x}^2 - V_e^2 & \text{при } \dot{x} < 0 \end{cases}$$

или

$$F(\dot{x}) - V_e^2 = \begin{cases} -2V_e\dot{x} + \dot{x}^2 & \text{при } \dot{x} > 0 \\ +2V_e\dot{x} + \dot{x}^2 & \text{при } \dot{x} < 0 \end{cases}$$

Пусть $\text{sign } x = 1$, если $x > 0$

$\text{sign } x = -1$, если $x < 0$

тогда $F(\dot{x}) - V_e^2 = -2\text{sign}x V_e \dot{x} + \dot{x}^2$.

Во втором виртуальном случае скорость движения электрода $|x| > V_e$, в этом случае электрод при движении снизу вверх будет перегонять поток жидкости и, следовательно, силы сопротивления будут направляться навстречу его движению, т. е. станут отрицательными.

Рассмотрим случай, когда $x \ll V_e$, при этих условиях уравнение (24) имеет вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k_1 + k_2}{\left(\rho_m + \frac{\rho_e}{2}\right)W} x = \frac{1}{8} \frac{\rho_e \zeta \pi D^2}{\left(\rho_m + \frac{\rho_e}{2}\right)W} (-2\text{sign}x V_e \dot{x})$$

Решение этого уравнения следует искать на двух отрезках (интервалах): движение вверх и движение вниз.

При движении электрода вверх, т. е. при $x > 0$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k_1 + k_2}{\rho_e \left(\rho_* + \frac{1}{2}\right)W} x = -\frac{1}{8} \frac{\rho_e \zeta \pi D^2}{\rho_e \left(\rho_* + \frac{1}{2}\right)W} V_e \dot{x} \quad (25)$$

Обозначим:

$$K^2 = \frac{k_1 + k_2}{\rho_e \left(\rho_* + \frac{1}{2}\right)W} \quad 2n = \frac{1}{8} \frac{\rho_e \zeta \pi D^2}{\rho_e \left(\rho_* + \frac{1}{2}\right)W} V_e$$

Тогда уравнение (25) можно переписать:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2n\dot{x} + K^2x = 0$$

Решение ищем в виде $x = e^{\lambda t}$, тогда

$$\lambda^2 e^{\lambda t} + 2n\lambda e^{\lambda t} + K^2 e^{\lambda t} = 0$$

Получаем характеристическое уравнение вида:

$$\lambda^2 + 2n\lambda + K^2 = 0$$

где $\lambda_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - K^2}$

При этом возможны два случая: $n > K$

при $\frac{1}{16} \zeta \pi D^2 > \sqrt{(k_1 + k_2) \rho_e \left(\rho_* + \frac{1}{2}\right)W}$

В этом случае $\sqrt{n^2 - K^2} > 0$, обозначим через $K_1 = \sqrt{n^2 - K^2}$, тогда:

$$\lambda_{1,2} = -n \pm K_1$$

и два линейно независимых решения будут:

$$x = C_1 e^{-n+K_1 t} + C_2 e^{-n-K_1 t} = (C_1 e^{K_1 t} + C_2^{-K_1 t}) e^{-nt}.$$

При $n < K$, т. е. при

$$\frac{1}{16} \zeta \pi D^2 < \sqrt{(k_1 + k_2) \rho_e \left(\rho_* + \frac{1}{2}\right)W},$$

подкоренное выражение $\sqrt{n^2 - K^2} < 0$, поэтому, обозначив его через K_1^2 , получаем:

$$\lambda_{1,2} = -n \pm iK_1,$$

в этом случае решение может быть записано в виде:

$$x(t) = e^{-nt} (C_1 \cos K_1 t + C_2 \sin K_1 t), \quad (26)$$

где K_1 – круговая частота, а период затухающих колебаний определится как:

$$T = \frac{2\pi}{K_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{-n^2 + K^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{K^2 - n^2}}$$

Решение (26) справедливо только на полупериоде.

Рассматриваем второй случай – движение электрода вниз. В этом случае уравнение запишется в виде

$$\ddot{x} - 2n\dot{x} + K^2x = 0$$

Решение этого уравнения ищем по-прежнему в виде: $x = e^{\lambda t}$, тогда характеристическое уравнение принимает вид:

$$\lambda^2 - 2n\lambda + K^2 = 0,$$

где $\lambda_{1,2} = n \pm \sqrt{n^2 - K^2} = n \pm K_1$

При $n > K$ имеем:

$$x = e^{nt} (C_3 e^{-K_1 t} + C_4 e^{K_1 t}),$$

а при $n < K$, и $\lambda_{1,2} = n \pm iK_1$

$$x = e^{-nt} (C_3 \cos K_1 t + C_4 \sin K_1 t) \quad (27)$$

Это решение справедливо на полупериоде. Круговая частота $\omega = K_1$ и период колебаний находится по выражению:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{K^2 - n^2}}$$

Таким образом, на первом полупериоде колебания усиливаются, а на втором – затухают. Существование решения (27) обуслав-

ливает в целом вынужденные колебания электродов с периодом, равным:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_1 + k_2}{\rho_e (\rho_* + 1/2) W} - \left(\frac{1}{16} \frac{\zeta \pi D^2 V_e}{(\rho_* + 1/2) W} \right)}} \quad (28)$$

Наличие нескольких электродов на квазиупругих связях приведет, безусловно, к другому значению частоты, однако не изменит ее значение многократно.

В связи с этим в качестве расчетного значения частоты принимается выражение (28).

Список использованной литературы:

1. Российский статистический ежегодник. – М.: Госкомстат России, 1999. – 450 с.
2. Грановский М.Г., Лавров И.С., Смирнов О.В. Электрообработка жидкостей. – Л.: Химия, 1976. – 216 с.
3. Прокураков В.А., Смирнов О.В. Очистка нефтепродуктов и нефтесодержащих вод электрообработкой. СПб.: Химия. СПб. отделение, 1992. – 110 с.
4. А.с. 1546432 (СССР) Электрофлотатор / Сандаков С.А., Рязанов В.О., Худяков Н.П. и др. – Заявл. 02.04.86. №4066562/23-26; Опубл. 28.02.90. в Бюл. №8 МКИ С02F1/46.
5. Сандаков С.А. Повышение эффективности очистки сточных вод разработкой аппаратных схем электрофлотационных установок оборотного водопользования. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 1998. – 22 с.