

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЗАПОЛНЕНИЯ СЛАБОПРОВОДЯЩИМИ ЗАРЯЖАЮЩИМИСЯ ЖИДКОСТЯМИ (СПЗЖ) ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМОВ

Кириллов О.Л., Якимчук Г.С.

Введение.

Технологический процесс транспортирования слабо проводящих жидкостей в объемы всегда сопровождается зарядом самой жидкости во время ее движения по подающим трубопроводам [1-8], что вызывает накопление зарядов в заполняемом объеме. Данные процессы наблюдаются в технологиях заполнения замкнутых объемов на химических производствах, обеспечивающих транспортирование нефти и ее производных по суше и морю.

Основная проблема рассматриваемого процесса – определение оптимальных параметров производительности в зависимости от уровня заполнения. Несоблюдение данного требования приводит к выделению накопленной энергии зарядов на поверхности СПЗЖ в виде разрядов, приводящих к пожарам или взрывам.

В данной статье предлагается вывод оптимального закона заполнения замкнутых объемов с учетом условия безопасности процесса и экономической выгоды его ускорения во время заполнения.

Анализ последних публикаций.

Анализ проведенных исследований [1-8] показал, что в настоящее время технологическим процессом заполнения СПЗЖ управляют изменением величины производительности в зависимости от уровня заполнения объемов. В качестве интегрального параметра безопасности процесса выбран потенциал поверхности φ_{II} заполняемой СПЗЖ [2-5,7,8]. Методология современного решения задачи заполнения определяется поведением электростатического поля (ЭСП). В частности:

- величиной тока заряжения I_3 , входящего в резервуар из подающего патрубка [2-4,7,8], который определяется приближенным эмпирическим выражением [2]:

$$I_3 = \frac{A_i \times v^{m_i} d^{n_i}}{1,41 - 2 \lg(h_{эж}/d)}, \quad (1)$$

где A_i , m_i , n_i – параметры i -й выборки, определенные методом наименьших квадратов экспериментального исследования процесса, при постоянных контролируемых параметрах [2]; d – диаметр трубопровода; $h_{эж}$ – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности труб; v – скорость потока СПЗЖ в трубе;

- скоростью \bar{v} доставки заряда в точку ЭСП [6-8] или гидродинамическим полем объема СПЗЖ, в котором потенциал поля связан со скоростью СПЗЖ соотношением:

$$\bar{v} = -grad \varphi, \quad (2)$$

где φ – потенциал точки рассматриваемого пространства ЭСП жидкости;

- состоянием распределения зарядов в слое СПЗЖ [2,6-8]

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{v\tau}\right), \quad (3)$$

где z – координата уровня заполнения жидкостью; τ – время релаксации заряда в СПЗЖ; ρ_0 – начальная плотность заряда, втекающего в объем, которая определяется по формуле [6]:

$$\rho_0 = \frac{I_3}{\omega}, \quad (4)$$

где ω – производительность грузовой фракции;

- потенциалом поверхности φ_{II} заполняемой жидкости [2,6-8], описанным в аналитическом виде как функциональная модель опасного состояния системы:

$$\varphi_{II} = f[\rho_0(I_3, \omega), \tau, \bar{v}, h] \leq 36 \text{ кВ}. \quad (5)$$

По расчетной потенциальной картине при различных производительностях для СПЗЖ выбирают зоны работоспособности грузовой системы по условиям безопасности и формулируют в виде:

$$\begin{aligned} \text{SUP} \{ \varphi(\rho_0(I_3, \omega), \tau, \bar{v}, h) \} &\leq \varphi_{кр} \\ (x, y, z) &\in S_{II}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\varphi_{кр} \leq 36 \text{ кВ}$ – критерий электростатической безопасности; h – уровень (координата уровня) заполнения СПЗЖ; (x, y, z) – координаты исследуемой площади S_{II} поверхности СПЗЖ.

В результате каждому значению параметров $\{\varphi, \omega\}$ ставят в соответствие значение уровня заполнения объема на пересечении $\varphi(\omega, h)$ линии, проходящей на уровне критерия электростатической безопасности (рис.3.).

Следует также отметить, что процесс заполнения производится в два этапа (по рекомендациям ОСТ 5.6186-83[1]):

- первый - до уровня $h = 0,6 \text{ м}$ выполняется со скоростью $v = 1 \text{ м/с}$;
- второй - оставшийся объем, который заполняется по рекомендациям расчета потенциалов ЭСП на поверхности СПЗЖ (6).

Нерешенные части общей проблемы.

Исследование моделей определения безопасного состояния [2,4,5,7,8] технологического процесса приводит к следующему:

- в процессе движения жидкости происходит расширение площади соприкосновения СПЗЖ с незаряженным паровоздушным пространством;
- подача зарядов вместе с потоком жидкости в замкнутое пространство, способствует накоплению его как на поверхности, так и в объеме самой жидкости. При этом следует считать, что данный процесс неравномерно распределяет заряд в слое жидкости на каждом уровне заполнения с момента времени $t/\tau > 10$ [6].

Исследование свойств ЭСП при максимальной скорости заполнения приводит к необходимому условию безопасности процесса – балансу зарядов поверхности и объема жидкости:

$$Q_{II} = Q_{ж}, \quad (7)$$

где Q_{II} – заряд на поверхности СПЗЖ; $Q_{ж}$ – величина заряда концентрирующаяся в СПЗЖ ниже поверхности.

Их разбалансирование в сторону увеличения заряда на поверхности $Q_{II} > Q_{ж}$ приводит к выделению избыточной энергии в виде искры с последующим загоранием паров СПЗЖ или их взрывом.

Наряду с описанным материалом следует отметить, что не до конца рассмотрено влияние ЭСП на технологический процесс и не рассмотрены методы ускорения самого процесса. В частности:

- углубленно не описан источник входящих зарядов и его влияние на ЭСП;
- не дана оценка влияния экономического фактора на процесс.

Постановка задачи исследования.

Поднятые вопросы требуют определения оптимального закона управления технологическим процессом заполнения СПЗЖ в замкнутые объемы при уточнении механизма влияния ЭСП на процесс заполнения с учетом опасного состояния технологии.

Уточнение механизма влияния ЭСП на процесс заполнения.

Во время движения СПЗЖ приобретает кинетическую энергию. Обладая скоростью v , и неся в себе заряды генерации электрокинетического механизма [9,10], СПЗЖ входит в приемный резервуар и на некотором удалении от приемного трубопровода растворяется в окружающей ее жидкости.

Заряды, переносимые жидкостью, движутся, пополняя ее объемный и поверхностный заряды. Параллельно идут релаксационные процессы.

При анализе входящего потока наблюдается струя [11], которая состоит из следующих частей: компактная - цилиндрическая или близкая к ней форма; раздробленная - в виде расширения струи и разрушения ее на отдельные части; распыленная - состоит из отдельных капелек.

Анализ гидравлического механизма падающей струи выявил [11], что конец струи, которая входит в жидкость, определен крайней точкой ее целостности, как совокупности нераздельных струй. Эта точка образует ядро струи с постоянными усредненными скоростями. При дальнейшем удалении от этой точки ядро исчезает. Сечение, где струя сохраняет свою целостность, называется переходным. В этом же сечении сосредоточен обратный полюс, который характеризуется целостностью струи. Длина начального участка струи (от начального сечения к переходному сечению) определяется по формуле [11]:

$$L_{noch} = 0,67 r_0 / a_L, \tag{8}$$

где r_0 – радиус струи в жидкости; $a_L = 0,07...0,08$ – коэффициент для видов струй, симметричных оси всей струи.

Тогда глубину погружения x_3 струи в жидкость или ее длину можно определить как:

$$L_{noch} = 0,67(d/2a_L), \tag{9}$$

где d – диаметр трубопровода.

Следует отметить, что затопленные струи входят в жидкость на глубину, описанную в формуле (9), после чего растворяются в ней.

Теория гидравлического процесса незатопленной струи позволяет считать следующее: давление по длине струи сохраняется постоянным и равным давлению в окружающем пространстве; размер диаметра незатопленной части струи равен диаметру d_0 трубопровода; над жидкостью находится компактная часть струи [11].

При определении длины струи наблюдается движение ее в двух средах, паровоздушной и жидкости. В обоих случаях длина разная и рассчитывается следующим образом:

- движение в паровоздушной среде (длина свободного падения струи):

$$L = v \sqrt{\frac{2 * h_{TP}}{g}}, \tag{10}$$

где h_{TP} – высота трубопровода относительно уровня дна; g – ускорение свободного падения = $9,81 \text{ м/с}^2$;

- движение в среде жидкости, гидравлические условия [11]:

$$L = \frac{0,67 * d}{2 * a_L}, \tag{11}$$

Поскольку размеры струи по сравнению с размерами заполняемого пространства малы, то в первом приближении можно процесс истечения СПЗЖ считать заряженной осью и применять к нему законы электротехники [12,13].

В связи с этим покажем влияние заряженной оси на исследуемое поле.

Струя, которая выходит из трубопровода, представляет поток зарядов, которые механически перемещаются со скоростью v и образуют линейный ток в жидкости [2,13-15]. Ее заряд определяется по формуле (4) и в конечном счете представляет собою зависимость:

$$I_3 = \rho_0 \omega = \rho_0 v S_T, \quad (12)$$

где S_T – площадь сечения трубопровода.

Откуда, заряд самой струи определяется:

$$\rho_{CT} = \frac{I_3}{\omega} = \frac{I_3 t}{V_Z K_Z} = \frac{I_3 t S_T L}{S_D^2 h^2}, \quad (13)$$

где V_Z – вещественный объем входящего заряда за время t ; $K_Z = V_Z / V_S = S_D h / S_T L$ – коэффициент соотношения объема вещества всего заряда к объему, занимаемому областью струи; S_T – площадь сечения трубопровода; L – длина струи (10,11) до момента растворения в СПЗЖ.

Поскольку струя пересекает несколько пространств, то ее поле оказывает на них действие, определяемое коэффициентом перехода сред [13]:

$$K = \frac{\varepsilon_{aCTP}}{\varepsilon_{aOP}}, \quad (14)$$

где ε_{aCTP} – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества струи; ε_{aOP} – абсолютная диэлектрическая проницаемость окружающего струю пространства.

Анализируя (14) можно сделать вывод о воздействии линейного заряда компактной части струи на окружающее ее поле в различных средах.

Таким образом, интегральное определение электрофизического процесса, данного предыдущими разработчиками [2,7,8](15)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \oint jE dS + \oint \rho V dS = 0, \quad (15)$$

должно иметь дополнительный компонент, заряженную ось, что подтверждается [6]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \oint jE dS + \oint \rho V dS + \rho_{CT} dl = 0, \quad (16)$$

Уравнение (16) является базисным для описания ЭСП в неподвижной СПЗЖ.

Учет и уточнение опасного состояния технологии.

Обеспечение постоянства баланса заряда $Q_{II} \leq Q_{II MAX}$ на поверхности СПЗЖ и в заполняемом пространстве позволяет поддерживать постоянный потенциал на поверхности.

В аналитическом виде модель оптимального заполнения, учитывающая баланс зарядов $Q_{II} = Q_V + Q_L$ на поверхности СПЗЖ и внутри ее (с учетом опасного состояния системы), определяется согласно зависимости:

$$Q_{II} = f[\rho_0(I_3, \omega), \rho_{CT}(I_3, \omega, d), \tau, \bar{v}, h]. \leq Q_V + Q_L, \quad (17)$$

где $\rho_{CT}(I_3, \omega, d)$ – влияние заряда струи на поле слоя СПЗЖ.

Поскольку принято [16,17] в качестве критерия опасности технологии выбирать потенциал поверхности СПЗЖ, то аналитическая модель опасного состояния представляется:

$$\varphi_{II} = f[\rho_0(I_3, \omega), \rho_{CT}(I_3, \omega, d), \tau, \bar{v}, h]. \leq 36 \text{ кВ}. \quad (18)$$

Решение задачи исследования.

Как уже было сказано, оптимальная производительность объединяет фактор времени наряду с безопасностью процесса. В процессе закачки объемов СПЗЖ возникает необходимость изменять производительность и поддерживать ее значение на определенном уровне заполнения. При этом законы гидравлики показывают изменение состояния сопротивления жидкости при ее заполнении в зависимости от уровня закачки. Следовательно, процесс заполнения требует выработки технологической производительности и производительности процесса преодоления уровневого давления заполненного пространства. В дополнение к данным условиям необходимо не допустить выброс энергии накопленного заряда на поверхности СПЗЖ.

Для построения математической модели поставленной задачи исследования необходимо учитывать следующее.

1. Процесс проходит за максимально короткое время в среде жидкости и описывается уравнением [11]:

$$F \, dH / dt = \omega, \quad (19)$$

где F – площадь уровня; H – высота (уровень h); ω – объемный приход (расход) жидкости - производительность.

2. Во время заполнения должна быть обеспечена безопасность процесса, что требует в ЭСП баланса зарядов поверхности и внутри СПЗЖ:

$$Q_{\Pi} = Q_V + Q_L, \quad (20)$$

где Q_{Π}, Q_V, Q_L – заряды соответствующие поверхностному слою, объему СПЗЖ и втекающей струе.

3. Вектор состояния системы управления оптимальной производительностью определяется уровнем заполнения с учетом условия опасного состояния технологии и представляется как

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} h \\ Q_{\Pi} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

В результате общий вид процесса можно представить системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -\alpha_1 h + \frac{F_T}{S_D} + \frac{F_V}{S_T} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \frac{dQ_{\Pi}}{dt} = \alpha_2 \frac{dh}{dt} + Q_V + Q_L; \end{cases} \quad (23)$$

где α_1 – коэффициент постоянной времени заполнения; α_2 – коэффициент пропорциональности между гидравлическим и электрофизическим процессами; h – уровень заполнения; t – время заполнения; F_T – технологический расход СПЗЖ через трубопровод в объем; F_V – уровневый расход, создающий давление уровня заполненного СПЗЖ на входящий поток в объем через входной патрубок; S_T, S_D – площади сечения трубопровода и рассматриваемого уровня, соответственно.

Рассматриваемая модель имеет взаимосвязь совокупности гидравлического (22) и электрофизического (23) компонентов, которая осуществлена коэффициентами α_1 и α_2 .

Гидравлический компонент модели показывает баланс скорости заполнения объема при объемном приходе ω и противодействии ему уровневого давления во время нагнетания в объем СПЗЖ. Подстановка и раскрытие слагаемых уравнения (22) приводит к следующему виду

$$\frac{dh}{dt} = -\alpha_1 h + \frac{\omega}{S_D} + \frac{S_T \times \sqrt{2gh}}{S_T} = -\alpha_1 h + \frac{\omega}{S_D} + \sqrt{2gh}. \quad (24)$$

Электрофизический компонент модели (23) описывает изменение во времени заряда поверхностного слоя СПЗЖ при изменении уровня заполнения, а также влияния объемного заряда и заряженной оси на него. Раскрытие слагаемых (23) и их подстановка преобразует формулу в следующий вид:

$$\frac{dQ_{II}}{dt} = \alpha_2 \frac{dh}{dt} + \rho_0 \frac{\tau\omega}{V} + \frac{I_3 t S_T L}{S_D^2 h^2} = \alpha_2 \frac{dh}{dt} + \frac{I_3 \tau}{\omega t} + \frac{I_3 t \pi d_T^2 L}{4 S_D^2 h^2}, \quad (25)$$

где $\alpha_2 \frac{dh}{dt}$ – фактор регулирования электрофизическим балансом процесса при заполнении объема; V – объем СПЗЖ в резервуаре, в момент времени t .

Учитывая, что входной трубопровод находится на некотором расстоянии от дна, то в процессе заполнения требуется разделение временного промежутка процесса на: $(0 - t_1)$ – время заполнения до уровня трубопровода, обусловленное влиянием заряженной оси (9); $(t_1 - t_2)$ – время заполнения выше уровня трубопровода до полного заполнения (10).

Общее решение задачи.

Таким образом, для функционала цели, т.е. безопасного ускорения процесса заполнения:

$$\mathfrak{T} = \int_0^t dt, \quad (26)$$

где t – время заполнения объема, и динамики системы заполнения

$$\vec{x} = f(\vec{x}, \omega, \vec{u}), \quad (27)$$

с учетом ограничения по безопасности

$$Q_{II} \leq Q_{II \text{ MAX}} \quad (28)$$

где $Q_{II \text{ MAX}}$ – максимально допустимая величина заряда поверхности СПЗЖ, ставиться задача оптимального управления технологическим процессом заполнения замкнутых объемов:

$$\begin{cases} \bar{x}^*, \bar{\omega}^* = \min \mathfrak{T} \\ \dot{\bar{x}} = f(\bar{x}, \omega, \bar{u}) \\ Q_{II} \leq Q_{II \text{ MAX}} \end{cases} \quad (29)$$

а общий вид процесса представляется системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -\alpha_1 h + \frac{\omega}{S_D} + \sqrt{2gh} \\ \frac{dQ_{II}}{dt} = \alpha_2 \frac{dh}{dt} + \frac{I_3 \tau}{\omega t} + \frac{I_3 t \pi d_T^2 L}{4 S_D^2 h^2} \end{cases} \quad (30)$$

Подстановка и решение (30) относительно заряда Q_{II} приводит к общему уравнению процесса:

$$\frac{dQ_{II}}{dt} = -\alpha_2 \alpha_1 h + \alpha_2 \frac{\omega}{S_D} + \alpha_2 \sqrt{2gh} + \frac{I_3 \tau}{\omega t} + \frac{I_3 t \pi d_T^2 L}{4 S_D^2 h^2}. \quad (31)$$

Полное решение (31) с учетом процесса заполнения до уровня входного патрубка и оставшегося пространства относительно Q_{II} выглядит:

$$\begin{aligned}
 Q_{II} = & \int_0^{t_1} \left(-\alpha_2 \alpha_1 h + \alpha_2 \frac{\omega}{S_D} + \frac{I_3 \tau}{\omega t} + \frac{I_3 t \pi d_T^2 \sqrt{\frac{2(h_{TP} - h)}{g}}}{4 S_D^2 h^2} \right) \times dt + \\
 & + \int_{t_1}^{t_2} \left(-\alpha_2 \alpha_1 h + \alpha_2 \frac{\omega}{S_D} + \alpha_2 \sqrt{2gh} + \frac{I_3 \tau}{\omega t} + \frac{I_3 t \pi d_T^3 0,67}{8 \alpha_L S_D^2 h^2} \right) \times dt,
 \end{aligned} \quad (32)$$

где $(0 - t_1)$ – время заполнения до уровня трубопровода; $(t_1 - t_2)$ – время заполнения выше уровня трубопровода до полного заполнения объема.

При определении допустимой производительности приема груза, с учетом 2-х уровневых режимов заполнения решение первой части уравнения (32) не представляется важным и расчет задачи сводится ко второй части:

$$Q_{II} = \int_{t_1}^{t_2} \left(-\alpha_2 \alpha_1 h + \alpha_2 \frac{\omega}{S_D} + \alpha_2 \sqrt{2gh} + \frac{I_3 \tau}{\omega t} + \frac{I_3 t \pi d_T^3 0,67}{8 \alpha_L S_D^2 h^2} \right) \times dt, \quad (33)$$

где $t_1 = 0$ – начальное время оптимального процесса заполнения; $t_2 = t$ – конечное время оптимального процесса технологии.

В результате решения получаем:

$$Q_{II} = -\alpha_2 \alpha_1 h \times t + \alpha_2 \frac{\omega}{S_D} \times t + \frac{\alpha_2 \sqrt{2gh} \times t}{2} + \frac{I_3 \tau}{\omega} \varepsilon^t + \frac{I_3 t^2 \pi d_T^3 0,67}{16 \alpha_L S_D^2 h^2}. \quad (34)$$

Временной период t заменяем эквивалентной производительностью в соотношении с уровнем и площадью зеркала СПЗЖ с учетом [8]:

$$t = \frac{S_D h}{\omega}. \quad (35)$$

где S_D – площадь зеркала СПЗЖ.

Тогда в пересчете на уровень (34) принимает вид:

$$Q_{II} = -\frac{\alpha_2 \alpha_1 h S_D h}{\omega} + \frac{\alpha_2 h}{2} + \frac{\alpha_2 \sqrt{2gh} S_D h}{2\omega} + \frac{I_3}{\omega} \varepsilon^{\frac{\tau \omega}{S_D h}} + \frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{16 \alpha_L \omega^2}. \quad (36)$$

Руководствуясь постановкой задачи исследования, преобразуем уравнение (36) в равенство (37):

$$\frac{\alpha_2 \alpha_1 h S_D h}{\omega} - \frac{\alpha_2 h}{2} - \frac{\alpha_2 \sqrt{2gh} S_D h}{2\omega} = \frac{I_3}{\omega} \varepsilon^{\frac{\tau \omega}{S_D h}} + \frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{16 \alpha_L \omega^2} - Q_{II}. \quad (37)$$

Левая часть равенства (37) обеспечивает процесс заполнения по законам гидравлики с выполнением поставленной цели обеспечения оптимальной производительности.

Правая часть равенства (37) обеспечивает баланс поверхностного заряда, удерживающего безопасный потенциал на поверхности СПЗЖ.

Выделяем левую часть уравнения (37) в задачу относительно $\omega(t)$, приравнявая последнюю к нулю (энергетический баланс ЭСП).

В результате имеем:

$$\frac{\alpha_2 \alpha_1 h S_D h}{\omega} - \frac{\alpha_2 h}{2} - \frac{\alpha_2 \sqrt{2gh} S_D h}{2\omega} = 0. \quad (38)$$

Преобразуем (38):

$$\alpha_2 \times h \times \left[-\frac{\alpha_2 \alpha_1 h S_D}{\omega} + \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2gh} S_D}{2\omega} \right] = 0 \quad (39)$$

С математической точки зрения решение (39) имеет $3!=6$ решений, поскольку рассматривается 3 сомножителя, из которых один $\Rightarrow const$. В результате решение приводит к 2-м системам.

Первая не удовлетворяет постановке задачи поскольку не реализуется:

$$\omega = \begin{cases} \alpha_2 = 0; \\ h \neq 0; \\ \left[-\frac{\alpha_2 \alpha_1 h S_D}{\omega} + \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2ghS_D}}{2\omega} \right] \neq 0 \end{cases} . \quad (40)$$

Таким образом, решение следует искать во второй системе:

$$\omega = \begin{cases} \alpha_2 \neq 0; \\ h \neq 0; \\ \left[-\frac{\alpha_2 \alpha_1 h S_D}{\omega} + \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2ghS_D}}{2\omega} \right] = 0 \end{cases} . \quad (41)$$

Откуда вытекает уравнение процесса:

$$-\frac{\alpha_1 h S_D}{\omega} + \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2ghS_D}}{2\omega} = 0. \quad (42)$$

Преобразуем

$$\frac{\alpha_1 h S_D}{\omega} - \frac{\sqrt{2ghS_D}}{2\omega} = -\frac{1}{2} \quad (43)$$

и получаем

$$\frac{1}{\omega} \left(\alpha_1 h S_D - \frac{\sqrt{2ghS_D}}{2} \right) = -\frac{1}{2} \quad (44)$$

или

$$\frac{1}{\omega} = -\frac{1}{2(\alpha_1 h S_D - \sqrt{2ghS_D})}. \quad (45)$$

Инвертируем (45) и получаем закон управления производительностью $\omega(h)$ в зависимости от уровня заполнения объема:

$$\omega^*(h) = \alpha_2 (\sqrt{2ghS_D} - 2\alpha_1 h S_D) \times h. \quad (46)$$

В результате (46) следует считать оптимальным законом производительности заполнения на соответствующем уровне h при площади заполняемого уровня S_D .

Выделяем правую часть уравнения (37) и получаем:

$$Q_{II} = \frac{I_3}{\omega} \varepsilon^{\frac{\tau\omega}{S_D h}} + \frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{16\alpha_L \omega^2}. \quad (47)$$

В (47) заменяем переменные:

$$A = I_3, \quad B = \frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{16\alpha_L}, \quad C = \frac{\tau}{S_D h}, \quad D = Q_{II}, \quad (48)$$

Тогда уравнение представляется в следующем виде:

$$\frac{A}{\omega} \cdot e^{C\omega} + \frac{B}{\omega^2} = D, \quad (49)$$

Производим преобразование:

$$D = e^{c\omega \frac{A}{\omega}} + \frac{B}{\omega^2} = e^{cA} + \frac{B}{\omega^2}, \quad (50)$$

В результате подстановки в (50) величины оптимальной производительности (46) можно определить функциональную связь между изменением заряда на поверхности СПЗЖ и производительностью на определенном уровне заполнения. Соотношение после подстановки выглядит:

$$Q_{II} = e^{cA} + \frac{B}{\omega^2} = e^{\frac{\tau \times I_3}{S_{дh}}} + \frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{16\alpha_L \times (\alpha_2 (\sqrt{2gh} S_{д} - 2\alpha_1 h S_{д}) \times h)^2} =$$

$$= e^{\frac{\tau \times I_3}{S_{дh}}} + \frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{16\alpha_L \alpha_2^2 S_{д}^2 (\sqrt{2gh} - 2\alpha_1 h)^2 \times h^2}, \quad (51)$$

После сокращений и приведения подобных получаем зависимость величины заряда на поверхности СПЗЖ в зависимости от уровня заполнения при условии применения оптимальной производительности:

$$Q_{II} = e^{\frac{\tau \times I_3}{S_{дh}}} + \frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{16\alpha_L \alpha_2^2 S_{д}^2 h^2 (\sqrt{2gh} - 2\alpha_1 h)^2}. \quad (52)$$

Обратное решение функционала оптимальной производительности ω^* для определенного заряда на поверхности Q_{II} приводит к уравнению:

$$\omega = \pm \frac{d_T}{4} \times \sqrt{\frac{I_3 \pi d_T^3 0,67}{\left(Q_{II} - e^{\frac{\tau \times I_3}{S_{дh}}} \right) \alpha_L}}. \quad (53)$$

Соотношение (53) показывает чистую взаимосвязь ω и Q_{II} , не определяя налагаемые условия на уровень заполнения.

Полученное уравнение (53) позволяет сразу отказаться от отрицательного корня, поскольку в процессе отсутствует инверсия тока I_3 . Данное условие возникнет только при заполнении нефтепродуктом с большим количеством растворенной воды $\geq 0,007\%$ [2].

На основании полученных логических рассуждений были проведены расчеты и получены данные зависимости $\omega(t)$ при условии постоянства потенциала поверхности $\varphi_{II} \leq \varphi_{кр} = 36 \text{ кВ}$. Расчет производился на разработанной математической модели с учетом анализа выкладок [2,6-9] и их уточнения (12-16). Графический вид зависимостей представлен на рис.1.

Анализ [8] выявил, что технологическое заполнение с ростом производительности выполняется до определенной отметки - 4,5м, а затем производительность не меняется (черный график (рис.1.)).

В условиях поставленной задачи удерживания уровня потенциала поверхности $\varphi_{II} \leq \varphi_{кр}$ был произведен расчет величин производительности на соответствующих уровнях $h \geq 4,5 - 16 \text{ м}$, для объема размером: верхняя подволока = 18,2м; нижняя подволока = 25м; ширина объема = 18,2м; высота объема = 16м, $V = (18,2 \dots 25) \times 18,2 \times 16 \text{ (м}^3\text{)}$. В результате проведено расчетное сравнение затрат времени.

Предложенный метод заполнения по сравнению с данными источника [8] дает экономию во времени около 3-х часов, что в среднем ускоряет технологию процесса на $1,62 \text{ м}^3 / \text{с}$. Выводы представлены на рис.2.

Результатом расчетов (рис.3.) представлен графический вид оптимального закона управления процессом заполнения замкнутых объемов при условии баланса зарядов ЭСП на поверхности и внутри СПЗЖ.

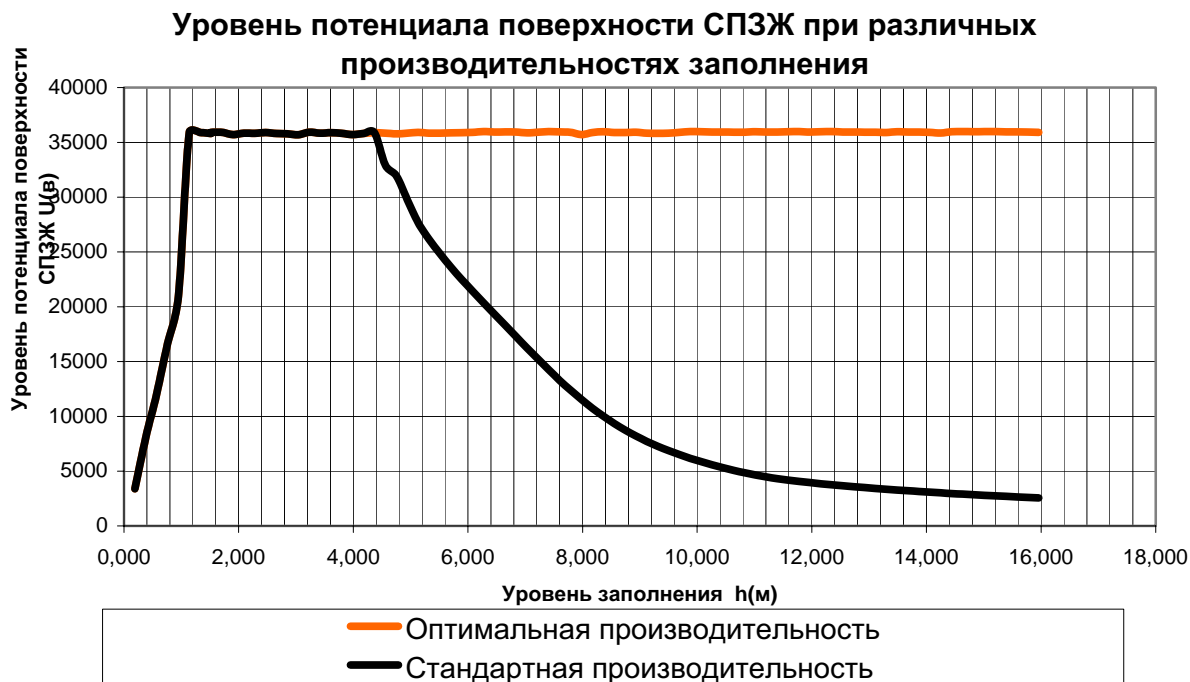


Рис.1 Функционал потенциала поверхности СПЗЖ φ_{II} при различных производительностях ω в зависимости от уровня h заполнения.

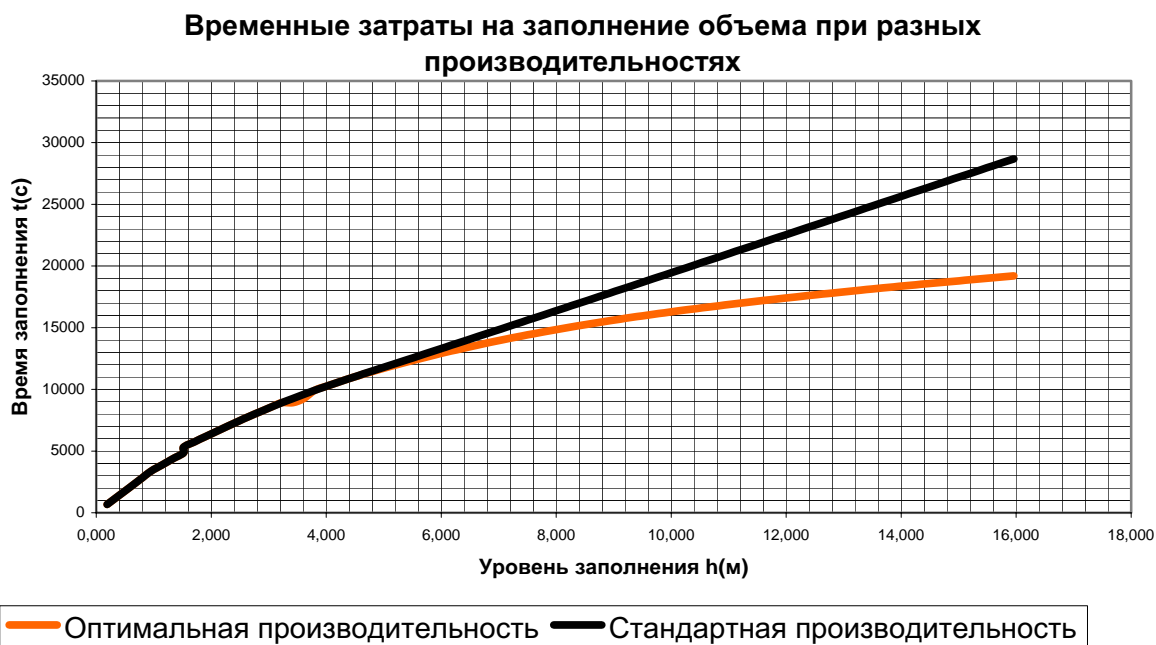


Рис.2. Временные затраты на заполнение объема при разных уровнях производительности.

Оптимальный закон управления процессом заполнения замкнутых объемов СПЗЖ

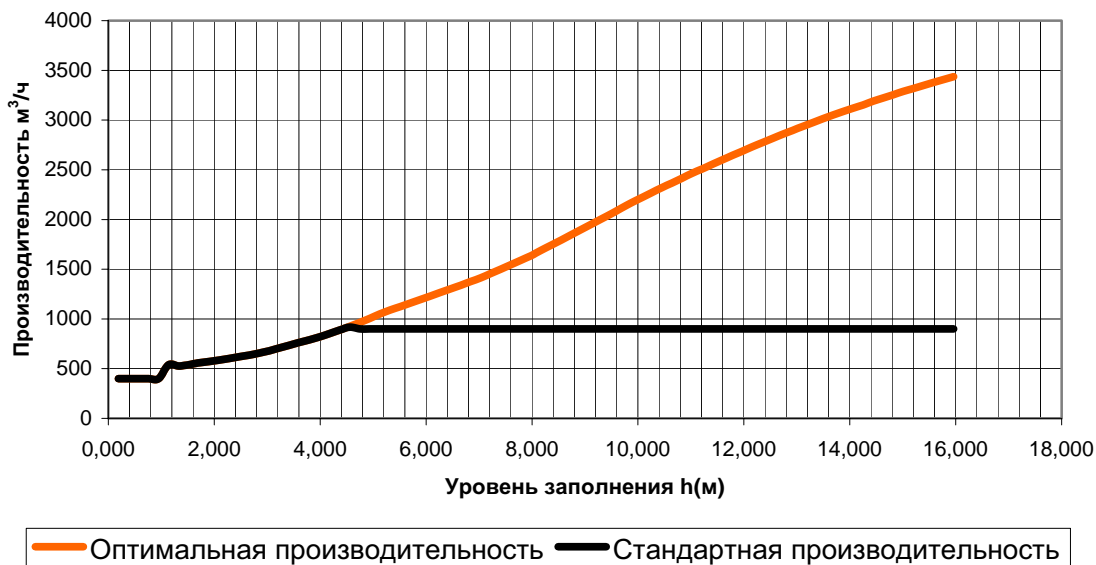


Рис.3. Оптимальный закон управления процессом заполнения замкнутых объемов СПЗЖ

Выводы.

В результате сопоставления расчетных данных получено:

- 1) оптимальный закон управления технологическим процессом на различных уровнях заполнения объемов;
- 2) определена математическая модель замкнутого объема как объекта управления в технологическом процессе заполнения его СПЗЖ;
- 3) определена взаимосвязь между производительностью ω и уровнем заряда на поверхности СПЗЖ Q_{II} ;
- 4) проведенное моделирование подтверждает теоретические предположения о реализуемости оптимального управления технологическим процессом;
- 5) проведен расчет потенциальной картины ЭСП процесса, который позволяет утверждать верность теоретического подхода к постановке задачи;
- 6) расчетные данные утверждают основание экономической выгоды рассматриваемого метода, в особенности при заполнении объемов большой емкости.

The given work - represents itself the analysis of a condition of theoretical development on maintenance of an optimality of management with technological process of filling of the closed volumes badly spending charged liquids (BSCL) under condition of safety of process of filling. In work the interrelation of balances of an electrostatic field (EF) is considered {examined}, at accumulation of charges on a surface Q_{II} and inside $Q_{Ж}$ BSCL, and hydro-dynamical process of filling of the closed volume. Has for an object comparison and generalization of hydro-dynamical and electrostatic approaches for maintenance of profitability of process.

1. ОСТ 5.6186-83. Отраслевой стандарт. Защита нефтеналивных судов от статического электричества. Технические требования. Группа Е 02. Введ. 01.01.84. - М.: Изд-во стандартов, 1984. – 26 с.
2. Максимов Б.К., Обух А.А., Тихонов А.В. Электростатическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 154с.
3. Максимов Б.К., Навацкий А.А., Обух А.А. Универсальный стенд для исследования электризации авиационных топлив // Электричество. 1973. №12 с. 12-13.
4. Максимов Б.К., Обух А.А., Тихонов А.В. Статическая электризация и нейтрализация зарядов жидкостей, транспортируемых по трубам // Тр. МЭИ. 1981. Вып.510. с.124 – 135.
5. Щигловский К.Б., Подольский Б.Д. Уравнение электрического поля движущейся заряженной жидкости и расчет релаксационных резервуаров.//ст. Защита от временного воздействия статического электричества. - М.:1975. – 43с.
6. Портной Г.Н., Юдин И.А. Распределение зарядов в движущейся слабопроводящей жидкости // Письма в ЖТФ, том 10, вып. 15, 12 августа 1984 г., -М.: Наука, 1984. 897-959 с.
7. Галка В.Л. Электростатическая безопасность нефтеналивных судов и кораблей. СПб.: Элмор. 1998.– 188с.
8. Проведение испытаний и исследований по оценке электростатической опасности при заполнении и механизированной мойке грузовых танков. // составлен ЦНИИСЭТ г. Ленинград., на разработку ЦКБ Изумруд, г. Херсон.
9. Kramer H., Asano K., Schon C. Criteria for safe filling of tankvehicles theoretical and experimental studies to assess to the electrical hazard. 3-rd Inter. Congr. Stat. Electricity, Grenoble, April 1977. Paper 31.
10. Kramer H., Asano K. Inundivity of sparks from surfaces of electrostatically charged liquids J. of Electrostatics, V. 6 (1979). PP. 361—374.
11. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 639 с.
12. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1989.
13. Бессонов Л.Н. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. -М.: Высш. шк., 1986. - 263 с.
14. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 848 с.
15. Государственный нормативный акт об охране труда: ДНА ОП 0.00-1.29-97: Утв. приказом Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда от 22.04.97 / Правила защиты от статического электричества. – Киев., Основа, - 1997. – 116 с.
16. Гавриленко Н.Д. Минимальные энергии зажигания паровоздушных смесей при различных температурах. Экспресс-информация ВНИИТБХП. Вып. 1. 1973.
17. ГОСТ 12. 1. 018—86. Пожарная безопасность. Электростатическая искробезопасность. Общие требования.