Ŭ/243

Šuchov, Vladimir Grigor'evič

MECHANISCHE ANLAGEN DER ERDÖLINDUSTRIE

Deutsche Vollübersetzung aus:

Inžener. Žurnal Ministerstva putej soobščenija. Sankt-Peterburg, 3 (1883), Bd 13, Nr 1, S. 500 - 507; 3 (1888), Bd 14, Nr 1, S. 525 - 533.
(Wiederabdruck in: V.G. Šuchov. Izbrannye trudy. Stroitel'naja mechanika [Ausgewählte Arbeiten zur Baumechanik; russ.]. Pod red. A.Ju. Išlinskogo; AN SSSR, Institut istorii, estestvoznanija i techniki, komissija po uvekovečenija pamjati početnogo akademika V.G. Šuchova. Moskva: Verlag "Nauka", 1977, S. 29 - 43).

Russ.: МЕХАНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Mechaničeskie sooruženija neftjanoj promyšlennosti

1. Die Lagerung von Erdöl und seinen Produkten

Erdöl und seine in großen Mengen verarbeiteten Produkte werden in Behältern oder Bassins gelagert, deren Material und Konstruktion völlig unterschiedlich sein können, wobei die Vielfalt - wie in jedem Industriebetrieb - ein Resultat der jeweiligen wirtschaftlichen Bedingungen und der technischen Kenntnisse der Erbauer ist.

Folgt man dem Erdöl von seinem Förderungsort bis zu der Stelle, wo es ge- und verbraucht wird, so stößt man auf allerlei Behälter zu seiner Lagerung: einfache Erdgruben mit einer Säule in der Mitte, die die Planken stützt, auf denen die Dielenbretter des Strohdaches ruhen; Holzbottiche, die durch Eisenreifen zusammengehalten werden; gewöhnliche zementierte Steinbassins und schließlich Behälter aus Eisen.

Wir halten es für überflüssig, hier auf den Bau von Gruben und Bottichen einzugehen, die zum Lagern von Öl benutzt werden; diese Einrichtungen sind sehr primitiv und außerdem völlig unzureichend hinsichtlich einer rationellen wirtschaftlichen Erdöllagerung.

Die Erfahrung zeigt, daß hinsichtlich der Baukosten und auch hinsichtlich der Benutzung Eisenbehälter die wirtschaftlich günstigsten Lagerstätten sind, die deshalb heutzutage auch den Steinbassins vorgezogen werden. Letztere sind hinsichtlich ihrer Verwendung in vielem ungeeigneter und ihre Kosten sind wesentlich höher als diejenigen der Eisenbehälter, und ihr einziger Vorzug, der in der größeren Temperaturkonstanz der eingegossenen Flüssigkeit besteht, entfällt von selbst durch die fortschreitende Entwicklung beim Transport des Erdöls und seiner Produkte, das nunmehr auf Schiffen und in Tankwagons befördert wird.

Der vorliegende Aufsatz befaßt sich hauptsächlich mit der Beschreibung von Behältern aus Eisen. Dies ist um so notwendiger, da die technische Literatur bekanntlich die Frage des rationellen Baus von Eisenbehältern, die der Lagerung von flüssigen Stoffen dienen, nicht behandelt.

BEHÄLTER AUS EISEN

Der gewöhnliche eiserne Behälter stellt einen zylindrisch geformten Körper mit ebenem Boden dar, der auf einem Fundament ruht und ein konisches oder flaches Dach besitzt. Die Behälterwände werden durch mehrere aus Eisenblechen vernietete Ringe gebildet; über ein Winkelblech wird der untere Ring gewöhnlich mit der Sohle verbunden. Der oberste Ring schließt ebenfalls mit einem Winkelblech ab, das als Stütze für den Dachverband dient.

Die beigefügte Zeichnung 1 zeigt einen in unserer Erdölindustrie verbreiteten Behälter. Wie aus dieser Zeichnung hervorgeht, besteht der Dachverband des Behälters aus kegelförmig aufgelegten Brettern; mit dem einen Ende liegen die Bretter auf der Konsole oder Stoppleiste, die am oberen Winkeleisen befestigt ist, und mit dem anderen Ende gewöhnlich auf einem an der Spitze des Kegels befindlichen Eisenring. Die so aufgelegten Bretter werden mit Dachlatten bedeckt, auf denen das Blech des Daches ruht.

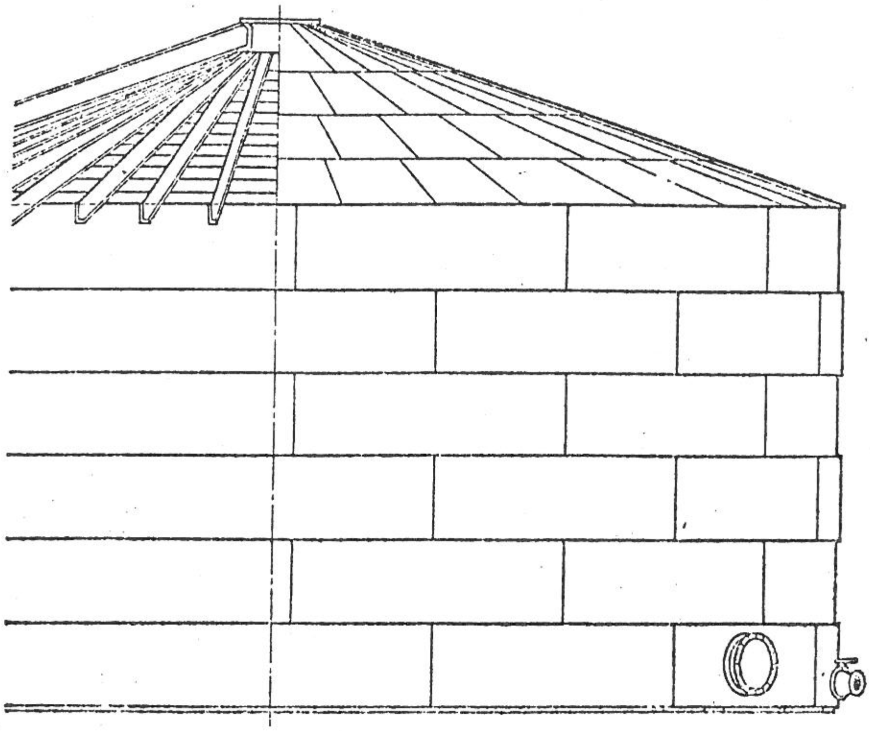


Abb. 1

Bei relativ großen Behältern mit mehr als 10 Sashen[1)] Innendurchmesser wird eine Säule aufgestellt, die zur Befestigung der Unterzüge der Dachbretter dient. Bei Flachdächern werden die Dachbretter durch Unterzüge gehalten, deren Fundament zumeist am unteren Winkeleisen befestigt ist, welches zur Verbindung der Wände mit der Sohle dient.

BERECHNUNG DER BEHÄLTER

Die in den Behälter gegossene Flüssigkeit erzeugt im Material der Behälterwände eine Spannung, die der Spannkraft entgegenwirkt, welche bekanntlich proportional ist zu Behälterdurchmesser und Pegel der eingegossenen Flüssigkeit. Folglich wird die größte Spannung im unteren Behälterring hervorgerufen und die geringste im oberen. Bestimmt man die Wanddicke nach dem Mindestwiderstand, dann fällt ihre Größe beim oberen Ring eines jeden Behälters weg, da unbeachtlich. Andererseits zeigt die Praxis des Behälterbaus, daß es nur ab einer bestimmten Blechdicke möglich ist, den Behälter genügend steif zu machen, damit die Vernietungen und Überplattungen dicht bleiben. Unabhängig

[1)] ehemaliges russisches Längenmaß = 2,133 m (Anm.d.Übers.)

von den auf den Behälter wirkenden Kräften sollte deshalb die Dicke des Eisens der Wände nicht unter dem bekannten Wert liegen, der sich aus den praktischen Bedingungen zwingend ergibt.

Nach denselben praktischen Bedingungen bestimmt sich auch die Dicke der Behältersohle, die kaum Außenkräften ausgesetzt ist, da sie in allen Punkten mit der Ebene des behälterbildenden Fundaments Kontakt hat.

Außer den durch den Druck der eingegossenen Flüssigkeit erzeugten Kräften unterliegen die Behälterwände auch noch der Einwirkung der Dachlast und der Windkraft, aber die durch diese Kräfte hervorgerufene Werkstoffspannung ist so gering hinsichtlich der geforderten Eisendicke, daß wir sie ohne jeden Verlust bezüglich Rechengenauigkeit beiseite lassen können.

Für das Behälterdach benötigt man entweder gewöhnliches Dachblech oder dünnes Eisenblech, dessen Dicke nicht mehr als 1/8" ausmachen soll.

Somit besteht das gesamte Material, das für den Bau eines Behälters benötigt wird, aus: Material, das den Kräften der eingegossenen Flüssigkeit entgegenwirkt; Material, das diesen Kräften nicht entgegenwirkt und nicht von ihnen abhängt, aber notwendiges Element zur Realisierung der gesamten Anlage darstellt. Bei der Bestimmung der Behälterabmessungen muß somit die Berechnung folgende Bedingungen berücksichtigen: geringstes Gewicht an benötigtem Eisen bei jeweiligem Fassungsvermögen des Behälters und praktisch möglicher geringster Eisendicke, die für Sohle, Dach und Wände des Behälters erforderlich ist.

Abb. 2 soll den Schnitt durch die Behälterwände in der Ebene darstellen, die durch seine Achse verläuft; a_1a_2, a_2a_3, ..., $a_{n-1}a_n = a$[1) bezeichnen die Höhe der vernieteten Eisenblechringe, aus denen die Behälterwand besteht.

Wir bezeichnen mit

P Fassungsvermögen des Behälters,

---

1) Erstabdruck: aa_1, a^1a_2, a_2a_3 usw. $a_{n-1}a_n = a$ (Anm.d.Übers.)

R Behälterdurchmesser und H Höhe,

γ Druck pro Einheit der Flüssigkeitshöhe,

T ständiger Widerstand des Eisens,

$\delta = \gamma RH/T = HR/\alpha$ Dicke des unteren Ringes, $a_{n-1}a_n$,

δ_1 Dicke des oberen Eisenringes, die durch die praktischen Bedingungen dichter Vernietungen und Überplattungen vorgegeben wird,

H_1 Höhe, für die die Behälterringe von der Behälterspitze her die gleiche Dicke δ_1 besitzen,

δ_n und δ_m Dicke des Eisens von Sohle und Dach,

e Dickenabweichung des Eisens von zwei aufeinanderfolgenden Ringen.

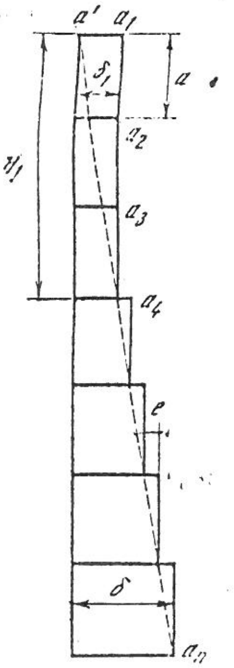


Abb. 2

Die durch die Flüssigkeit in einem beliebigen Wandteil des Behälters hervorgerufene Kraft beträgt: γRx[1), wobei x den Abstand des betrachteten Wandteils vom Flüssigkeitspegel bezeichnet. Die für diese Kraft notwendige Wanddicke beträgt $\gamma Rx/T$; wird der Behälter voll gefüllt, drückt sich seine Wanddicke graphisch durch die Gerade $a'a_n$[2) aus, und der größte Wert dieser Dicke beträgt $\delta = \gamma RH/T = RH/\alpha$, wobei $\alpha = T/\gamma$. Der Behälter muß so gebaut sein, daß die bezeichnete graphi-

---

1) Erstabdruck: $-\gamma Rx$ (Anm.d.Übers.)

2) Erstabdruck: a_1a_n (Anm.d.Übers.)

sche Dicke seiner Ringe immer die gerade Linie $a'a_n$ überdeckt, und daß die Abmessungen dieser Dicke sich proportional zum Abstand dieses Ringes vom oberen Behälterrand verändern, d.h. die Gleichung $e = Ra/\alpha$ muß immer gelten. Bei geringem Behältervolumen kann die Größe δ rechnerisch unter δ_1 liegen; deshalb muß man zwei Behältertypen unterscheiden: der eine, bei dem $\delta_1 > \delta$, d.h. wo keine Spannungen des dem ständigen Widerstand entsprechenden Werkstoffes vorkommen, und andere, wo $\delta > \delta_1$.

Das für den Behälter notwendige Eisenvolumen berechnet sich folgendermaßen:

Eisenvolumen von Sohle und Dach

$$q_1 = \pi R^2 (\delta_n + \delta_m) = \pi R^2 \lambda$$

notwendiges Eisenvolumen für den Widerstand gegenüber den Kräften, die durch die eingegossene Flüssigkeit hervorgerufen werden, oder Volumen des gespannten Eisens

$$q_2 = 2\pi RH\delta/2 = \pi RH\delta$$

Volumen des für den Widerstand unbeanspruchten Eisens

$$q_3 = \pi RH_1\delta_1$$

das Volumen des zusätzlichen Eisens in jedem Ring, wobei $\delta > \delta_1$, beträgt πRae; die Anzahl derartiger Ringe an einem Behälter beträgt $(H - H_1)/a$, folglich ist das Gesamtvolumen des zusätzlichen Eisens gleich

$$q_4 = \pi Rae (H - H_1)/a = \pi Re (H - H_1),$$

aber da $e = Ra/\alpha$, ist

$$q_4 = \pi R^2 \frac{a}{\alpha} (H - H_1).$$

Bezüglich des Eisenvolumens, welches für die Winkeleisen, Überplattungen, Vernietungen und sonstige Befestigungen des Dachverbandes benötigt wird, kann dieses praktisch vollkommen durch das bekannte prozentuale Verhältnis der für den Behälter erforderlichen Eisengesamtmenge ausgedrückt werden.

Das für den Bau eines Behälters erforderliche Eisengesamtvolumen beträgt somit

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = \pi R^2\lambda + \pi RH\delta + \pi RH_1\delta_1 + \\ + \pi \frac{R^2 a}{\alpha} H - \frac{\pi R^2 a}{\alpha} H_1. \qquad (1)$$

Da aber $\delta = RH/\alpha$, $H_1 = \delta_1 \alpha/R$, ist

$$Q = \pi R^2\lambda + \frac{\pi R^2 H^2}{\alpha} + \pi \delta_1^2 \alpha + \frac{\pi R^2 a}{\alpha} H - \pi R a \delta_1.$$

Wir setzen hier Ausdruck R aus $\pi R^2 H = P$ ein und erhalten

$$Q = P\frac{\lambda}{H} + P\frac{H}{\alpha} + \pi(\delta_1)^2\alpha + P\frac{a}{\alpha} - \sqrt{\pi R}\frac{1}{\sqrt{H}}a\delta_1.$$

Bei Behältern mit großem Volumen ist das letzte Glied von Ausdruck Q so unbeträchtlich, verglichen mit sonstigen Behältern, daß man es bei der Bestimmung der günstigsten Behälterabmessungen vernachlässigen kann. Deshalb nehmen wir an, daß

$$Q = P\frac{\lambda}{H} + P\frac{H}{\alpha} + \pi(\delta_1)^2\alpha + P\frac{a}{\alpha}.$$

Um das geringste Q ausfindig machen zu können, muß eine Ableitung von seiner Darstellung nach H gefunden und gleich Null gesetzt werden. Wir erhalten dadurch

$$\frac{dQ}{dH} = P\left(-\frac{\lambda}{H^2} + \frac{1}{\alpha}\right) = 0,$$

woraus folgt:

$$H = \sqrt{\lambda\alpha}, \qquad \text{(I)}$$

und somit beträgt die geringste Eisenmenge, welche für einen Behälterinhalt benötigt wird,

$$Q_{\min} = \left\{2\sqrt{\frac{\lambda}{\alpha}} + \frac{a}{\alpha}\right\}P + \pi(\delta_1)^2\alpha. \qquad \text{(II)}$$

A n m e r k u n g. Die somit ermittelten Gleichungen (I) und (II) weichen von der tatsächlichen Darstellung für Höhe und Gewicht nur ganz gering ab, die man auch durch Fortrechnungen ermitteln kann, ohne das letzte Glied in der Gleichung (1) wegzulassen.

Denn: nimmt man die erste Ableitung aus der Darstellung für Q in Gleichung (1) nach H, so erhält man:

$$\frac{1}{P}\frac{dQ}{dH} = -\frac{\lambda}{H^2} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{P}}\frac{a\delta_1}{H^{3/2}} = 0,$$

oder

$$H^2 + \frac{1}{2}\alpha a\delta_1\sqrt{\frac{\pi}{P}}\sqrt{H} - \lambda\alpha = 0.$$

Wir lösen diese Gleichung bezüglich H und erhalten

$$H = \sqrt{\lambda\alpha + x^2} - \sqrt{\sqrt{2x}\sqrt{x^2+\lambda\alpha} - x^2},$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{m^3}{16} + \sqrt{\left(\frac{\lambda\alpha}{3}\right)^3 + \left(\frac{m^2}{16}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{m^2}{16} - \sqrt{\left(\frac{\lambda\alpha}{3}\right)^3 + \left(\frac{m^2}{16}\right)^2}},$$

wobei $m = {}^1/_2\alpha a\delta_1\sqrt{\pi/P}.$

Angemerkt sei weiter, daß Behälter, bei denen $\delta > \delta_1$ bei $\delta_1 = 3/16''$, kein geringeres Fassungsvermögen haben können als 20 000 Kubikfuß.

Bei der Darstellung aller Größen in Zoll ermitteln wir, wenn wir annehmen, daß $\lambda = 1/4''$, $a = 48''$, für $\lambda a = 75\,000$ $(\lambda a/3)^3 = 15\,625\,000\,000\,000$ und $m = 100$ für den ungünstigsten Fall, d.h. für $P = 20\,000$. Bei solchen Zahlenwerten ist die Größe x ebenfalls schwer zu bestimmen, da sie nahe bei Null liegt, weshalb man, fast ohne zu irren, $x = 0$ und dann $H = \sqrt{\lambda a}$ setzen kann.

Die tatsächliche Eisenmenge beträgt bei derartigem H:

$$Q = \left\{ 2\sqrt{\lambda a} + \frac{a}{a}\sqrt{\frac{\pi}{P}}\,\frac{1}{\sqrt[4]{\lambda a}}\,a\delta_1 \right\} P + \pi(\delta_1)^2 a.$$

Das von uns in Gleichung (II) beiseitegelassene Glied $\sqrt{\frac{\pi}{P}}\,\frac{1}{\sqrt[4]{\lambda a}\,a\delta_1}$ ist so unbedeutend, daß es sich nicht lohnt, es bei der Bestimmung des Behältergewichts zu berücksichtigen; dies umso mehr, da beim Entwerfen von Behältern unweigerlich Fehler in der Verteilung der Eisendicke in den nachfolgenden Ringen auftreten, wodurch das Gesamtgewicht des Behälters immer größer ausfällt.

Bei $\delta > \delta_1$, d.h. im Falle von Behältern, in deren Wänden eine Veränderung der Eisendicke vorliegt, die proportional ist zu den einwirkenden Kräften, werden somit die Abmessungen aus Gleichung (1) bestimmt, und das Gewicht des dafür erforderlichen Eisens darf den durch Gleichung (II) bestimmten Wert nicht überschreiten. Dabei gilt:

Gleichung (I) zeigt; alle rationell gebauten Behälter, d.h. die die Bedingungen min des für ihren Bau benötigten Eisens erfüllen, müssen gleich hoch sein, wobei ihre Höhe von der praktisch vorgegebenen Eisendicke der Sohle und des Daches und vom Dauerwiderstandswert abhängt, der im Eisen zulässig ist, d.h. von der Eisengüte.

Gleichung (II) zeigt: das Eisenvolumen und folglich auch sein Gewicht, das die Bedingung min erfüllt, ist proportional zum Fassungsvermögen P des Behälters, wobei, unabhängig von diesem Fassungsvermögen, jedem Behälter ein und dieselbe Menge an kräftewiderstandsmäßig unnötigem Werkstoff beigegeben wird, die durch den Wert $\pi(\delta_1)^2 a$ ausgedrückt wird.

Ersetzt man z.B. zwei rationell gebaute Behälter mit einem Fassungsvermögen von je P Kubikfuß durch einen einzigen mit dem Fassungsvermögen 2P, spart man demnach eine Werkstoffmenge von $\pi(\delta_1)^2\alpha$. Wissen wir die Größe dieser Einsparung, läßt sich leicht die Grenze finden, über die hinaus die Behälterabmessungen jegliche Bedeutung verlieren, wenn man die praktischen Nachteile in Betracht zieht, die beim Nieten, Überplatten und beim Einlassen der Sohlen von übergroßen Behältern auftreten.

Zum Auffinden der allergünstigsten Behälterabmessungen mit einheitlicher Wanddicke über die gesamte Wandhöhe muß in Gleichung (I) für $\delta = \delta_1 = \text{const}$ und $H = H_1$ angenommen werden, wonach wir erhalten:

$$Q = \pi R^2\lambda + 2\pi RH\delta_1$$

oder

$$Q = P\frac{\lambda}{H} + 2\sqrt{P\pi H}\,\delta_1.$$

Zur Bestimmung von minimum Q gleichen wir die erste Ableitung von Q nach H durch Null an und erhalten

$$\frac{dQ}{dH} = -P\frac{\lambda}{H^2} + \sqrt{P\pi}\,\delta_1\frac{1}{\sqrt{H}} = 0,$$

woraus folgt:

$$H = \sqrt[3]{\frac{P}{\pi}\frac{\lambda^3}{\delta_1^2}} \qquad \text{und} \qquad R = \sqrt[3]{\frac{P}{\pi}\frac{\delta_1}{\lambda}}. \qquad \text{(III)}$$

Folglich muß in Behältern mit einheitlicher Wanddicke, d.h. bei solchen Wänden, die der Bedingung $\delta_1 > RH/\alpha$ genügen, die Relation $H/R = \lambda/\delta_1$ dafür gelten, daß die Menge des für die Behälter benötigten Eisens am geringsten ist.

Dieser Wert für die geringste Eisenmenge beträgt

$$Q = 3\sqrt[3]{\pi(\delta_1)^3\lambda}\,\sqrt[3]{P^2}. \qquad \text{(IV)}$$

Gleichung (IV) zeigt, daß in Behältern, bei denen $\delta_1 > RH/\alpha$, die günstigste Eisenmenge proportional ist zu P 2/3.

Das Höchstvolumen von Behältern, die der letztgenannten Berechnung genügen, läßt sich folgendermaßen bestimmen. Für das Höchstvolumen müssen die Gleichungen $\delta_1 = RH/\alpha$ und $H/R = \lambda/\delta_1$ gelten; bestimmen wir hieraus H und R und tragen ihre Werte in den Ausdruck $P = \pi R^2 H$ ein, so erhalten wir

$$P = \pi\delta_1^2 \sqrt{\frac{a^2}{\lambda}}, \qquad (V)$$

die Höhe eines solchen Behälters beträgt dann

$$H = \sqrt{a\lambda}.$$

Wir sehen somit, daß in allen rationell gebauten Behältern ihre Höhe zuerst proportional zur Quadratwurzel aus P zunimmt bis zum Höchstvolumen, das durch Gleichung (V) ausgedrückt wird, danach muß sie trotz des zunehmenden Fassungsvermögens der Behälter konstant bleiben. Die Gleichungen (I), (II), (III), (IV) und (V) können grundsätzlich alle Fragen lösen, die sich auf Behälter beziehen, wenn die Werte δ_1 und λ gegeben sind.[1)]

Bei den vorgehenden Schlußfolgerungen gingen wir von der Annahme aus, daß die Eisendicke des unteren Behälterringes durch die Gleichung $\delta = RH/a$ bestimmt wird, wobei H die volle Höhe des Behälters ist. Diese Annahme ist nicht ganz richtig, da offensichtlich die Sohle und ihr Winkeleisen Einfluß nehmen auf den Widerstand des unteren Ringes und ihr Einfluß bewirkt, daß sich der Bereich mit der größten Spannung im Eisen nach oben verschiebt, und daß die Größe dieser Spannung und folglich auch die Eisendicke des unteren Ringes nach der Gleichung $\delta = R\,(H - x)/a$ bestimmt werden müssen, wobei x einem bestimmten Wert entspricht, der das am stärksten angespannte Teil des unteren Ringes bestimmt. Um die Größe x zu bestimmen, müssen notwendigerweise die Bedingungen des Widerstandes des unteren Ringes zusammen mit dem Winkeleisen und der Sohle unter jenen Bedingungen untersucht werden, die durch den Druck der eingegossenen Flüssigkeit hervorgerufen werden.

Ist der Behälter mit Flüssigkeit gefüllt, wird der Radius der Zylinderfläche seiner Wände aufgrund der Dehnung des diesen Kräften unterworfenen Werkstoffes etwas vergrößert. Der Einfluß von Sohle und unterem Winkeleisen behindert diese Werkstoffausdehnung der Wände und läßt die Annahme gerechtfertigt erscheinen, daß die Behältersohle mit dem daran genieteten Winkeleisen nach dem Füllen des Behälters keinen Veränderungen ausgesetzt ist, da die von den Wänden auf die Sohle übertragenen Radialkräfte zu gering sind, um hier eine radiale Ausdehnung in der Werkstoffmasse zu erzeugen, welche Sohle und unteres Winkeleisen ausmacht.

---

1) An dieser Stelle endet in der Erstveröffentlichung der 1. Teil von Šuchovs Aufsatz mit dem Hinweis "Fortsetzung folgt". (Anm.d.Übers.).

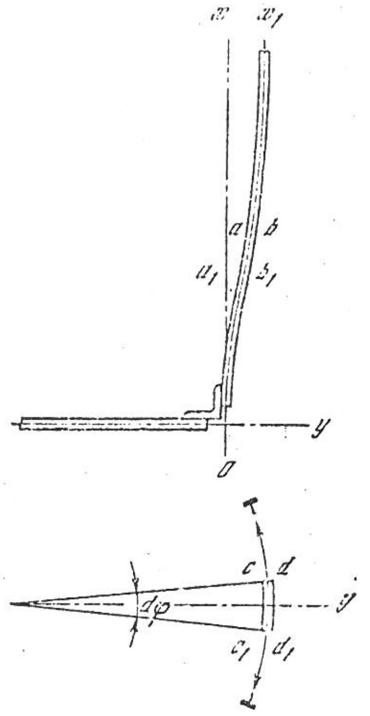


Abb. 3

In Abb. 3 bezeichnen: ox mittlere Zylinderfläche der Behälterwände bis zum Eingießen der Flüssigkeit; ox_1 Formveränderung der Zylinderfläche nach dem Eingießen von Flüssigkeit in den Behälter; R Radius des unteren Behälterringes; δ Behälterwanddicke; H Behälterhöhe. Wir wählen ox und oy als Koordinatenkreuz und untersuchen die Kräfte, die auf das unendlich kleine Teil $aba_1b_1cdc_1d_1$ einwirken. Das Volumen dieses Teils beträgt $\delta R d\varphi dx$. S und (S + dS) bezeichnen die Spannungskomponenten im Schnitt der auf das Teil parallel zur Achse oy wirkenden Kräfte. T bezeichnet die Bruchspannungskomponente der auf das Teil wirkenden Kräfte, und $p = (H - x)\gamma$ steht für den Flüssigkeitsdruck, wobei γ das Gewicht der Flüssigkeitskubikeinheit bezeichnet.

Dadurch daß δ bezüglich R unbedeutend ist, können wir annehmen, daß die Spannung des Werkstoffs in allen Punkten dieses Teils gleich ist.

Nimmt man $\sin d\varphi = d\varphi$ an, betragen die auf das von uns untersuchte Teil in oy-Richtung wirkenden Kräfte

$$pRd\varphi dx - dS\delta Rd\varphi - T\delta dxd\varphi = 0,$$

wonach

$$pR = (H - x)\gamma R = \delta R \frac{dS}{dx} + T\delta. \tag{2}$$

Da die Bruchspannung gleich der Werkstoffausdehnung ist, multipliziert mit dem Elastizitätsfaktor, ist in Gleichung (2) T = Ey/R, wobei E Elastizitätsfaktor ist.

Die Gleichgewichtsbedingung der Kraftmomente ergibt:
Moment der Trägheitskräfte, die im Teil hervorgerufen werden

$$E\frac{\delta^3}{12}Rd\varphi\frac{1}{\rho}-E\frac{\delta^3}{12}Rd\varphi\left(\frac{1}{\rho}+d\left(\frac{1}{\rho}\right)\right)=-E\frac{\delta^3}{12}Rd\varphi d\left(\frac{1}{\rho}\right),$$

wobei ρ Krümmungsradius ist;
Moment der äußeren Kräfte $\rho\delta Rd\Theta dx$.

Nimmt man, wie dies in den Ableitungen des Werkstoffwiderstandes getan wird, $1/\rho = d^2y/dx^2$ an, so erhalten wir

$$E\frac{\delta^3}{12}R\frac{d^3y}{dx^3}=-\rho R\delta.$$

Wir differenzieren beide Teile der Gleichung, setzen den Wert ds/dx aus Gleichung (2) ein und erhalten

$$E\frac{\delta^3}{12}R\frac{d^4y}{dx^4}=-(H-x)\gamma R+E\frac{y}{R}\delta. \tag{3}$$

Zur Integration dieser Gleichung geben wir ihr folgende Gestalt

$$\frac{d^4y}{dx^4}=-\frac{12}{\delta^2R^2}\left\{(H-x)\frac{\gamma R^2}{E\delta}-y\right\}$$

und erhalten nach Bezeichnung

$$\sqrt[4]{\frac{12}{4\delta^2R^2}}=\frac{\sqrt[4]{3}}{\sqrt{\delta R}}=f,$$

durch Integration

$$y=(H-x)\frac{\gamma R^2}{E\delta}-e^{fx}(C\cos fx+C_{\mathrm{I}}\sin fx)-$$
$$-e^{-fx}(C_{\mathrm{II}}\cos fx+C_{\mathrm{III}}\sin fx), \tag{4}$$

wobei C, C_{I}, C_{II} und C_{III} vier Konstanten bezeichnen.

Zur Bestimmung dieser Konstanten sei folgendes bemerkt: Bei x = 0, y = 0 ist auch dy/dx = 0, da wir annehmen, daß der Sohlenrand des Behälters unbeweglich bleibt. Bei x = H, d.h. am oberen Behälterrand, haben wir ebenfalls y = 0. Diese Bedingungen liefern die Gleichungen, welche die vier Konstanten bestimmen:
die Bedingung x = 0, y = 0 ergibt

$$H\frac{\gamma R^2}{E\delta}=C+C_{\mathrm{II}}; \tag{a}$$

die Bedingung x = 0, dy/dx = 0 ergibt

$$C_{\mathrm{II}}-C=C_{\mathrm{I}}+C_{\mathrm{III}}+\frac{\gamma r^3}{E\delta f}; \tag{b}$$

die Bedingung y = 0 bei x = H ergibt folgende Gleichung

$$e^{fH}(C\cos fH + C_{\mathrm{I}}\sin fH) + e^{-fH}(C_{\mathrm{II}}\cos fH + C_{\mathrm{III}}\sin fH) = 0$$

oder

$$(Ce^{fH} + C_{\mathrm{II}}e^{-fH})\cos fH + (C_{\mathrm{I}}e^{fH} + C_{\mathrm{III}}e^{-fH})\sin fH = 0.$$

Diese Gleichung zerfällt in zwei Gleichungen:

$$Ce^{fH} + C_{\mathrm{II}}e^{-fH} = 0 \qquad C_{\mathrm{I}}e^{fH} + C_{\mathrm{III}}e^{-fH} = 0. \qquad \text{(c), (d)}$$

Bemerkt sei, daß e^{-fH} ein sehr geringer Wert ist, so daß wir ohne hohe Fehlergröße annehmen können, daß $C_{II}e^{-fH} = 0$ und $C_{III}e^{-fH} = 0$ und folglich auch $C = 0$ und $C_I = 0$ ist. Diese Bedingungen ergeben für uns aus Gleichung (a) $C_{\mathrm{II}} = H\gamma R^2/E\delta$ und aus Gleichung (b)

$$C_{\mathrm{III}} = \frac{\gamma R^2}{E\delta}\left(H - \frac{1}{f}\right).$$

Wir setzen die ermittelten Konstanten in Gleichung (4) ein und erhalten

$$y = (H - x)\frac{\gamma R^2}{E\delta} - e^{-fx}\frac{H\gamma R^2}{E\delta}\cos fx - e^{-fx}\left(\frac{H\gamma R^2}{E\delta} - \frac{\gamma R^2}{E\delta f}\right)\sin fx$$

oder

$$y = \frac{\gamma R^2}{E\delta}\left\{H - x - He^{-fx}\left(\cos fx + \left(1 - \frac{1}{Hf}\right)\sin fx\right)\right\}.$$

Um die Berechnungen zu vereinfachen, kann man die Größe 1/fH in dem Faktor weglassen, der vor sinfx steht, da H um vieles größer ist als 1/f, und wir erhalten schließlich

$$y = \frac{\gamma R^2}{E\delta}\{H - x - e^{-fH}H(\cos fx + \sin fx)\}. \qquad (5)$$

Wir differenzieren diese Gleichungen nach x und erhalten

$$\frac{dy}{dx} = f\frac{\gamma R^2}{E\delta}\left\{-\frac{1}{f} + 2e^{-fx}H\sin fx\right\},$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 2f^2\frac{\gamma R^2}{E\delta}He^{-fx}(\cos fx - \sin fx) \text{ и}$$

$$\frac{d^3y}{dx^3} = -4f^2R\frac{\gamma R^2}{E\delta}e^{-fx}\cos fx. \qquad (6)$$

Die Gleichungen (5) und (6) beantworten die Frage nach den Schnitt- und Zugkräften im unteren Ring und im unteren Winkeleisen des Behälters völlig.

Wir ermittelten: die Spannung des Eisens in der Parallele ist

$$T = \frac{Ey}{R} = \frac{\gamma R}{\delta}\{H - x - e^{-fx}H(\cos fx + \sin fx)\} \qquad (7)$$

und die Spannung des Werkstoffs aus den Schnittkräften ist

$$S = -E\frac{\delta^2}{12}\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{\delta}{3}f^3H\gamma R^2e^{-fx}\cos fx,$$

da aber $f^3 = \sqrt[4]{3^3}/\sqrt{\delta^3 R^3}$, gilt folglich

$$S = -\frac{H\gamma}{\sqrt[4]{3}}\sqrt{\frac{R}{\delta}}\,e^{-fx}\cos fx. \qquad (8)$$

Die Gleichung (7) zeigt, daß die Spannung des Eisens und folglich auch seine Dicke, die dem Dauerwiderstand entspricht, im unteren Ring geringer ist, als wir bei der Herleitung der allergünstigsten Behälterabmessungen angenommen hatten, nämlich

$$\delta = HR/\alpha = H\gamma R/T \quad \text{oder} \quad T = H\gamma R/\delta.$$

In Wirklichkeit ist bei $x = 0$, d.h. an der Behältersohle, die Bruchspannung $T = 0$, und der Werkstoff erfährt nur die Schubspannung S, die wesentlich geringer ist als der Wert $H\gamma R/\delta$. Des weiteren: beginnen wir bei der Sohle und gehen zur Spitze hoch, d.h. lassen x stetig zunehmen, kann man erkennen, daß der Wert T bis zu einem gewissen Wert $x = h$, bei dem $\cos fx + \sin fx$ verschwindet, geringer ist als $\frac{\gamma R}{\delta}(H - x)$, und bereits von daher muß man annehmen, daß der Wert T der Kraft des Flüssigkeitsdrucks entspricht. Was die Spannung S betrifft, so nimmt sie, wie dies aus Gleichung (8) hervorgeht, schnell ab, wenn man x stetig zunehmen läßt. Auf der Grundlage von Gleichung (7) bei einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit des Wertes δ muß die Frage so gestellt werden, daß der Wert T gleich dem Dauerwiderstand des Werkstoffs ist. Eine genaue Beantwortung dieser Frage ist nicht möglich, da f Funktion von δ ist; der Weg zu einer ausreichend angenäherten Lösung über sukzessive Vertauschungen setzt komplizierte Berechnungen voraus. Denn nehmen wir δ als Konstante an, die aus $\delta = HR/\alpha$ bestimmt ist, ermitteln wir, daß der größte Wert von T bei x liegt, der aus Gleichung $dT/dx = 0$ bestimmt, was wiederum

$$\sin fx e^{-fx} = 1/2Hf \qquad (9)$$

ergibt. Dabei ist $d^2T/dx^2 = -1 + \mathrm{ctg} fx$ immer negativ innerhalb von $fx = \pi/4$ bis $fx = \pi$, und folglich ist T max bei diesen Werten von d^2T/dx^2. Die Lösung der Gleichung (9) kann durch sukzessive Vertauschungen ermittelt werden.

Wir nehmen an, daß nach den gegebenen Werten P, λ und δ und den daraus bestimmten Werten H, R und δ durch sukzessive Vertauschungen die Lösung von Gleichung (9) gefunden werden kann. Diese Lösung sei $x = h$, dann beträgt die größte Bruchspannung

$$T = \frac{\gamma R}{\delta}\{H - h - e^{-fh}H(\cos fh + \sin fh)\}.$$

Aus dieser Gleichung können wir, wenn wir f unverändert lassen, den Wert $\delta = \delta_0$ unter der Bedingung bestimmen, daß T gleich dem Dauerwiderstand ist. Kennen wir δ_0, können wir f_0 bestimmen und müssen nach Einsetzen dieser beiden Größen in Gleichung (7) den neuen Wert $x = h_0$ finden, um das größte T zu ermitteln, wonach auf demselben Wege die neue Größe $\delta = \delta_0'$ zu ermitteln ist, und dies so lange, bis zwei Lösungen für δ vorliegen, die sich sehr ähnlich sind. Für die angenäherte Lösung kann man sich auf den zweiten Wert, d.h. auf δ_0' beschränken, doch ist der Weg dorthin in jedem Fall sehr lang.

Viel einfacher kommt man zu einer Lösung, die für praktische Berechnungen ausreichend ist, wenn man bestimmt, wie sehr der größte Wert von T davon abweicht, was $T = \frac{\gamma R}{\delta}\{H - x\}$ entspricht, wobei x aus der Gleichung $e^{fx}H(\cos fx + \sin fx) = 0$ bestimmt wird.

Die erste Lösung dieser Gleichung ist $fx = {}^3/_4\pi =$ annähernd 2,3.

Durch zahlreiche Berechnungen kann man sich davon überzeugen, daß das Maximum von T um nicht mehr als 2 % von der Lösung abweicht, die auf diese Weise für Behälter mit bis zu 200 000 Kubikfuß Fassungsvermögen ermittelt wurde, und deshalb kann man mit einer für die Praxis völlig ausreichenden Genauigkeit die Formel zur Bestimmung von δ folgendermaßen darstellen:

$$\delta = \frac{(H - 2{,}2/f)\,R}{\alpha},$$

wobei f nach $\delta = HR/\alpha$ bestimmt wird, da $f = \sqrt[4]{3}/\sqrt{\delta R} = \sqrt[4]{3}\sqrt{\alpha}/R\sqrt{H}$, und folglich ist

$$\delta = \left(H - 1{,}66\,\frac{R\sqrt{H}}{\sqrt{\alpha}}\right)\frac{R}{\alpha}. \qquad (10)$$

Was die Dicke der übrigen Ringe betrifft, so ist sie zu berechnen ohne Berücksichtigung der Wirkung der Überplattungen, d.h. nach der Formel $\delta = (H - h)R/\alpha$, wobei h der Abstand des jeweiligen Ringes von der Sohle ist.

Der von den Überplattungen auf den Widerstand der Blechplatten bewirkte Einfluß ist äußerst gering; er kann auf dieselbe Weise untersucht werden, die wir gewählt haben bei der Untersuchung des Einflusses der Behältersohle. Die Gleichung ist in diesem Fall die gleiche, d.h. (4), aber bei der Bestimmung der Konstanten hat man es mit sehr komplizierten Berechnungen zu tun, die nur in Einzelfällen lösbar sein werden, wenn man den Umstand nutzt, daß einige Zahlenwerte unbedeutend sind.

Wenn man die günstigsten Behälterabmessungen bestimmen will, wobei man den durch Gleichung (10) gegebenen Wert δ berücksichtigt, dann ist die Abweichung von dem durch die Gleichung (I) gegebenen Wert H so unbedeutend, daß man sie nicht mal in Zahlen angeben kann, und deshalb bleibt die günstigste Höhe gleich. Die Bedeutung der Gleichung (10) drückt sich dadurch aus, daß sie ein um durchschnittlich 9 % geringeres Gewicht des unteren Ringes ergibt.

Wir wollen die Verwendung der genannten Gleichungen an einigen Beispielen verdeutlichen.

Da die Erdölindustrie bei ihrer Nachfrage nach Behältern ihre eigenen Angaben für das Fassungsvermögen in Kubikfuß oder in Pud[1] macht, und da auf unserem Eisenmarkt die Abmessungen des Eisens zudem in Zoll angegeben werden, geben wir unsere Beispiele so an, daß sie unmittelbar in Fuß und in Zoll praktisch angewandt werden können.

Der zu bauende Behälter soll mit Wasser gefüllt werden, weshalb wir einen Druck wählen, der durch eine Erdölsäule erzeugt wird, die gleich dem Druck desselben Wasserstandes ist. Wir wählen den Dauerwiderstandsfaktor T = 300 Pud auf 1 Quadratzoll.

Das Gewicht des Kubikzolls Wasser ist 0,001 Pud und der Faktor ist deshalb $\alpha = 300/0{,}001 = 3 \times 10^5$. Für die Sohlendicke werden gewöhnlich 3/16 " genommen, was für ein dichtes Vernieten und Überplatten völlig ausreicht. Daß die Nietnähte auch beim Einlassen der Sohlen von grossen Behältern halten, ist hierdurch völlig gewährleistet. Die Eisendicke des Daches beträgt meist nicht mehr als 1/16 ". Nehmen wir $\lambda = {}^3/_{16}{}'' + {}^1/_{16}{}''$, dann beträgt die günstigste Höhe $H = \sqrt{\lambda\alpha} = 274'' = 22{,}83'$; $\lambda = {}^3/_{16}{}'' + {}^1/_{8}{}'', H = 25{,}6'$; $\lambda = {}^1/_{4}{}'' + {}^1/_{8}{}'', H = 28'$; δ_1 ist in der Mehrzahl der Fälle gleich 3/16 " und 5/32 ", selten 1/8 ". Die Blechplatten, die die Behälterringe bilden, sind gewöhnlich 48 " breit.

---

[1] ehemaliges russisches Gewichtsmaß = 16,38 kg. Verwendet wurde auch noch die Bezeichnung "Eimer", die die gleiche Größe bezeichnet (Anm. d.Übers.)

Ist das Fassungsvermögen des Behälters gegeben, so sind zuerst λ und δ_1 zu wählen, und dann, wenn das vorliegende Fassungsvermögen größer ist als jenes, welches uns Gleichung (V) gibt, ist die Höhe nach Formel (I) zu bestimmen, d.h. $H = \sqrt{\lambda a}$. Ist aber das vorliegende Fassungsvermögen geringer, als durch Formel (V) bestimmt, muß die Höhe nach Gleichung (III) ermittelt werden.

Bei dem von uns angenommenen Dauerwiderstandswert von 300 Pud auf 1 Quadratzoll hat die Gleichung (V) die Gestalt $P_e = 290\,000\ \delta_1^2 \sqrt{1/\lambda}$, wobei P_e in Kubikfuß, λ und δ_1 in Zoll anzugeben sind. Nimmt man z.B. $\delta_1 = {}^3/_{16}''$ und $\lambda = {}^1/_4''$ an, dann beträgt das Höchstvolumen P_e = 20 000 Kubikfuß.

Das für Behälter mit einem Fassungsvermögen größer P_e benötigte Eisengewicht darf nicht über dem durch Gleichung (II) vorgegebenen Wert liegen. Nehmen wir für das Kubikfußgewicht des Eisens 13,3 Pud an, so stellen wir fest, daß das Behältergewicht bei einem Dauerwiderstand von 300 Pud $\Pi = 13{,}3Q = (0{,}046 \sqrt{\lambda} + 0{,}00213)\ P + 7300\delta_1^2$ (Pud) sein muß, wobei P das Fassungsvermögen in Kubikfuß und λ und δ_1 in Zoll angeben. So ist z.B. bei $\lambda = {}^1/_4''$ und $\delta_1 = 3/16''$

$$\Pi = 0{,}02513P + 257.$$

Zu dem auf diese Weise bestimmten Gewicht muß man noch 10 % hinzufügen für die Winkeleisen, Überplattungen und Vernietungen. Das durch diese Zugabe korrigierte Gewicht beträgt bei $\lambda = {}^1/_4''$ und $\delta_1 = {}^3/_{16}''$ $\Pi = 0{,}028P + 282$; $\lambda = {}^7/_{32}''$ und $\delta_1 = {}^3/_{16}''$, $\Pi = 0{,}024P + 282$; $\lambda = {}^7/_{32}''$ und $\delta_1 = {}^5/_{32}''$, $\Pi = 0{,}024P + 200$.

Die Wanddicke des unteren Ringes bestimmt sich nach Formel (10), die bei $a = 3 \times 10^5$ die Gestalt $\delta = (\Pi - 0{,}003R\sqrt{\Pi})\ R/a$ hat, wobei δ, Π und R in Zoll angegeben sind. Die mit dieser Gleichung gefundene Größe δ ist in Gleichung (7) einzusetzen, um zu erkennen, ob die Bedingung des Dauerwiderstands beim größten T-Wert eingehalten wird.

Das Eisengewicht von Behältern mit einem Fassungsvermögen unter P_e wird durch die Gleichung (IV) beschrieben, die bei $\lambda = {}^1/_4''$ und $\delta = 3/16''$

$$13{,}3Q = \Pi = \sqrt[4]{P^2} \text{ (Pud)}$$

ergibt, wobei P in Kubikfuß angegeben ist.

Zu dem nach Gleichung (IV) bestimmten Gewicht für kleinere Behälter müssen 15 % für die Winkeleisen, Überplattungen und Vernietungen zugegeben werden.

Wir müssen nun nur noch die Bedingungen der günstigsten Nietnähte untersuchen und einige praktische Einzelheiten für den Bau und die Montage von Behältern aufzeigen, , was Gegenstand eines gesonderten Aufsatzes sein soll.[1)]

[1)] An dieser Stelle endet in der Erstveröffentlichung der 2. Teil von Šuchovs Aufsatz mit dem Hinweis "Fortsetzung folgt". Eine Fortsetzung - zumindest in dieser Zeitschrift - hat es jedoch nicht gegeben. Nach sowjetischem Archivmaterial gibt es auch keine entsprechenden Handschriften. Allerdings hat sich Šuchov erneut viele Jahre später in seiner Arbeit über die "Bestimmung der Hauptabmessungen von senkrechten zylindrischen Behältern mit flacher Sohle" mit diesem Problem befaßt. Diese Arbeit umfaßt § 2 des 4. Kapitels in: Kandeev, V.I., Kotljar, E.F.: Stal'nye rezervuary ⟨Stahlbehälter; russ.⟩. Hrsg. und mit einem Vorwort versehen von V.G. Šuchov. Moskva-Leningrad: Gosmašmetizdat, 1934. - In dieser Arbeit präzisiert Šuchov die hier vorgelegten Berechnungen (Anm.d.Übers.).

Stuttgart, den 20. Oktober 1981

übersetzt von

Ottmar Pertschi

(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer

1.1.

МЕХАНИЧЕСКІЯ СООРУЖЕНІЯ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

I. Храненіе нефти и ея продуктовъ.

Нефть и ея продукты вырабатываемые въ большихъ количествахъ сохраняются въ резервуарахъ или бассейнахъ, матеріалъ и конструкція которыхъ могутъ быть крайнѣ разнообразны, при чемъ, какъ и во всякомъ промышленномъ сооруженіи, разнобразіе это является результатомъ сочетанія мѣстныхъ экономическихъ условій и техническихъ познаній строителей.

Такъ—если слѣдовать по пути движенія нефти отъ мѣста ея добычи до районовъ потребленія, то можно встрѣтить хранилища ея въ видѣ простыхъ земляныхъ ямъ со столбомъ внутри, служащимъ для опоры брусьевъ, на которыхъ покоится настилъ досчатой крыши; въ видѣ деревянныхъ чановъ, стянутыхъ желѣзными обручами; въ видѣ обыкновенныхъ каменныхъ выложенныхъ цементомъ бассейновъ и наконецъ въ видѣ желѣзныхъ резервуаровъ.

Мы считаемъ лишнимъ говорить здѣсь объ устройствѣ ямъ и чановъ для храненія нефти, устройствѣ, которое очень просто, и кромѣ того эти типы хранилищъ совершенно исчезаетъ въ раціонально веденномъ нефтяномъ хозяйствѣ.

Опытъ показываетъ, что наиболѣе экономичными хранилищами, какъ по стоимости устройства, такъ и въ отношеніи эксплоатаціи являются желѣзные резервуары, которые въ настоящее время совершенно вытѣснили употреблявшіеся прежде каменные бассейны. Послѣдніе представляютъ много неудобствъ въ отношеніи эксплоатаціи и стоимость ихъ выходитъ дороже сравнительно съ желѣзными, единственное ихъ преимущество, заключающееся въ большемъ постоянствѣ температуры налитой жидкости, падаетъ само собою при развитіи перевозки нефти и ея продуктовъ наливомъ въ баржахъ и въ вагонахъ-цистернахъ.

Настоящую статью мы посвятимъ главнымъ образомъ описанію желѣзныхъ резервуаровъ. Это тѣмъ болѣе необходимо, что насколько намъ извѣстно, техническая литература почти не затрогиваетъ вопроса о раціональномъ устройствѣ желѣзныхъ резервуаровъ, служащихъ для храненія жидкихъ тѣлъ.

Желѣзные резервуары.

Обыкновенный типъ желѣзнаго резервуара представляетъ собою тѣло цилиндрической формы съ плоскимъ днищемъ покоющемся на основаніи и съ коническою или такъ-же плоскою крышею.

Стѣны резервуара образуются рядомъ колецъ, склепанныхъ изъ листоваго желѣза; нижнее кольцо соединяется съ днищемъ помощію угольника. Верхнее кольцо оканчивается также угольникомъ, который служитъ опорою для стропилъ крыши.

На прилагаемомъ при семъ чертежѣ I изображенъ типъ резервуара наиболѣе распространенный въ нашей нефтяной промышленности.

Стропила крыши резервуара, какъ это видно на чертежѣ, состоятъ изъ досокъ расположенныхъ по образующимъ конуса; однимъ концомъ доски упираются въ кронштейны или башмаки прикрѣпленные къ верхнему угольнику, а другимъ въ общее чугунное кольцо помѣщенное на вершинѣ конуса. Установленныя такимъ образомъ доски покрываются обрѣшетиною, на которую ложится желѣзо крыши.

Въ случаѣ значительныхъ размѣровъ резервуара при діаметрѣ больше 10-ти саженей внутри его помѣщается столбъ служащій для укрѣпленія подпорокъ стропильныхъ досокъ.

Въ плоскихъ крышахъ стропильныя доски держатся помощію подпорокъ, основаніе которыхъ большею частью укрѣпляется въ нижній угольникъ, служащій для соединенія стѣнъ съ днищемъ.

Расчетъ резервуаровъ.

Жидкость налитая въ резервуаръ вызываетъ въ матеріалѣ его стѣнокъ напряженіе сопротивляющееся усилію разрыва, которое, какъ извѣстно, пропорціонально діаметру резервуара и высотѣ уровня налитой въ него жидкости; слѣдовательно наибольшое напряженіе въ матеріалѣ резервуара будетъ вызываться въ его нижнемъ кольцѣ, а наименьшее въ верхнемъ; и если опредѣлять толщину стѣнокъ подъ условіемъ достаточнаго сопротивленія, то величина ея для верхняго кольца всякаго резервуара выйдетъ очень незначительной. Съ другой стороны практика сооруженія даетъ возможность только при извѣстной толщинѣ желѣза сдѣлать резервуаръ достаточно жесткимъ и достигнуть необходимой герметичности склепки и чеканки его швовъ; а потому, независимо отъ усилій, дѣйствующихъ на резервуаръ, толщина желѣза его стѣнокъ не должна быть менѣе извѣстной величины опредѣляемой требованіями практическихъ условій.

Такими же практическими требованіями опредѣляется и толщина желѣза днища резервуара, которое почти не испытываетъ дѣйствія внѣшнихъ силъ, такъ какъ оно соприкасается во всѣхъ точкахъ съ плоскостью основанія, на которомъ устанавливается резервуаръ.

Кромѣ усилій вызываемыхъ давленіемъ налитой жидкости, стѣны резервуара подвержены еще дѣйствію груза крыши и силѣ вѣтра, но напряженіе матеріала вызываемое этими силами настолько незначительно по отношенію къ толщинѣ употребляемаго желѣза, что безъ всякаго ущерба для точности вывода они могутъ быть неразсматриваемы.

Для крыши резервуара употребляется или обыкновенное кровельное желѣзо или же тонкое листовое, толщина котораго не превышаетъ $^1/_8''$.

Такимъ образомъ весь матеріалъ употребляемый для устройства резервуара дѣлится:—на матеріалъ сопротивляющійся усиліямъ налитой жидкости, и на матеріалъ не сопротивляющійся этимъ усиліямъ и независящій отъ нихъ, но составляющій необходимый элементъ для осуществленія всего устройства; и задача расчета резервуара должна заключаться въ опредѣленіи его размѣровъ подъ условіемъ наименьшаго вѣса употребленнаго на него желѣза при данной вмѣстимости резервуара и выработанной практикой наименьшей толщинѣ желѣза употребляемаго на дно, крышу и стѣны резервуара.

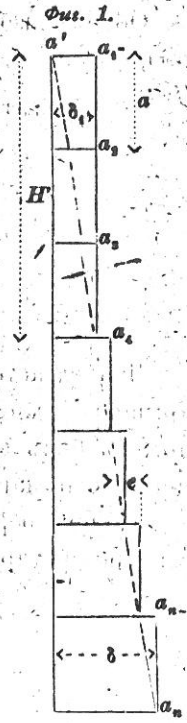
Пусть фиг. I изображаетъ разрѣзъ стѣнки резервуара плоскостью проходящей чрезъ его ось; aa_1, a^1a_2, a_2a_3, и т. д. $a_{n-1}\ a_n = a$ обозначаютъ склепанныя кольца листового желѣза, изъ которыхъ состоитъ стѣнка резервуара.

Обозначимъ черезъ

P—вмѣстимость резервуара,

R—его радіусъ и H—высота.

Фиг. 1.



γ — давленіе единицѣ высоты жидкости,

T — прочное сопротивленіе желѣза,

$\delta = \frac{\gamma RH}{T} = \frac{HR}{\alpha}$ толщина нижняго кольца $a_{n-1}a_n$,

δ_1 — толщина желѣза верхняго кольца, даваемая практическими условіями герметичной склепки и чеканки,

H_1 — высота на которой отъ верха резервуара кольца его имѣютъ однообразную толщину δ_1.

δ_n и δ_m — толщина желѣза дна и крыши.

e — разность въ толщинѣ желѣза двухъ послѣдующихъ колецъ.

Усиліе вызываемое жидкостью въ произвольномъ элементѣ стѣнки резервуара будетъ: — γRx гдѣ x разстояніе разсматриваемаго элемента отъ уровня жидкости. Необходимая толщина стѣнки для сопротивленія этому усилію будетъ $\frac{\gamma Rx}{T}$; при полномъ наливѣ резервуара толщина его стѣнъ графически выразится прямою $a_1\ a_n$ и наибольшее значеніе этой толщины будетъ $\delta = \frac{\gamma RH}{T} = \frac{RH}{\alpha}$, гдѣ $\alpha = \frac{T}{\gamma}$. Резервуаръ долженъ быть построенъ такимъ образомъ, чтобы нанесенная графически толщина его колецъ вездѣ перекрывала прямую линію $a_1\ a_n$ и размѣры этой толщины должны измѣняться пропорціонально разстоянію кольца отъ верха резервуара, т. е. всегда должно существовать равенство $e = \frac{Ra}{\alpha}$. При небольшой емкости резервуаровъ величина δ можетъ выйти по расчету меньше величины δ_1 и потому необходимо различать два рода резервуаровъ, одни, въ которыхъ $\delta_1 > \delta$, т. е. такіе, гдѣ нѣтъ напряженія матеріала соотвѣтствующаго прочному сопротивленію и другіе, гдѣ $\delta > \delta_1$.

Объемъ желѣза, входящаго въ составъ резервуара будетъ слѣдующій:

Объемъ желѣза дна и крыши

$$q_1 = \pi R^2\ (\delta_n + \delta_m) = \pi R^2\ \lambda.$$

Объемъ желѣза, необходимаго для сопротивленія усиліямъ вызываемымъ налитою жидкостью или объемъ напряженнаго желѣза.

$$q_2 = 2\,\pi RH.\,\frac{\delta}{2} = \pi RH\delta.$$

Объемъ желѣза, безполезнаго для сопротивленія:

$$q_3 = \pi RH'\delta_1.$$

Объемъ избыточнаго желѣза въ каждомъ кольцѣ, гдѣ $\delta > \delta_1$ будетъ πRae; число колецъ такого рода въ резервуарѣ составляетъ $\frac{H\text{-}H^1}{a}$, слѣдовательно полный объемъ избыточнаго желѣза будетъ

$$q_4 = \pi Rae \frac{H\text{-}H^1}{a} = \pi Re\,(H\text{-}H^1), \text{ но}$$

$$e = \frac{Ra}{\alpha} \text{ и потому}$$

$$q_4 = \pi R^2 \frac{a}{\alpha}(H\text{-}H^1).$$

Что касается до объема желѣза, идущаго на угольники, перекрышки, заклепки и разныя части скрѣпленій стропилъ, то онъ можетъ быть выраженъ практически вполнѣ вѣрно извѣстнымъ процентомъ общаго количества желѣза, идущаго на резервуаръ.

Такимъ образомъ, полный объемъ желѣза, идущаго на устройство резервуара, будетъ:

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

$$(1) \;\ldots\; = \pi R^2\lambda + \pi RH\delta + \pi RH^1\delta_1 + \pi\frac{R^2a}{\alpha}H - \frac{\pi R^2a}{\alpha}H^1$$

$$\text{но } \delta = \frac{RH}{\alpha},\; H^1 = \frac{\delta_1\alpha}{R}$$

слѣдовательно:

$$Q = \pi R^2\lambda + \frac{\pi R^2H^2}{\alpha} + \pi(\delta^1)^2\alpha + \frac{\pi R^2a}{\alpha}H - \pi Ra\delta_1$$

внося сюда выраженіе R изъ $\pi R^2 H = P$, получимъ

$$Q = P\frac{\lambda}{H} + P\frac{H}{\alpha} + \pi(\delta_1)^2\alpha + P\frac{a}{\alpha} - \sqrt{\pi P}\,\frac{1}{\sqrt{H}}\,a\delta_1.$$

Въ резервуарахъ большой емкости послѣдній членъ выраженія Q настолько незначителенъ по сравненію съ остальными, что его можно отбросить при опредѣленіи наивыгоднѣйшихъ размѣровъ резервуара. На этомъ основаніи принимаемъ

$$Q = P\frac{\lambda}{H} + P\frac{H}{\alpha} + \pi(\delta_1)^2\alpha + P\frac{a}{\alpha}.$$

Для отысканія наименьшаго Q, слѣдуетъ взять производную отъ его выраженія по H и приравнять ее нулю.

Сдѣлавъ это, имѣемъ:

$$\frac{dQ}{dH} = P\left(-\frac{\lambda}{H^2} + \frac{1}{\alpha}\right) = o \text{ откуда}$$

$$(I) \;\ldots\ldots\ldots\; H = \sqrt{\lambda\alpha}$$

и наименьшее количество желѣза, которое можетъ быть употреблено на содержаніе резервуара будетъ

$$\text{(II)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad Q_{min} = \left\{ 2\sqrt{\frac{\lambda}{\alpha}} + \frac{a}{\alpha} \right\} P + \pi(\delta_1)^2 \alpha$$

Примѣчаніе. Полученныя такимъ путемъ уравненія I и II, весьма мало отклоняются отъ истиннаго выраженія высоты и вѣса, къ которымъ можно придти путемъ продолжительнаго вычисленія, не отбрасывая послѣдняго члена въ уравненіи 1.

Въ самомъ дѣлѣ, если взять первую производную отъ выраженія Q въ уравненіи 1-мъ по H, то будемъ имѣть:

$$\frac{1}{P}\,\frac{dQ}{dH} = -\frac{\lambda}{H^2} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{P}} \cdot \frac{a\,\delta_1}{H^{3/2}} = 0,$$

$$\text{или } H^2 + \frac{1}{2}\,\alpha.\,a.\,\delta_1 \sqrt{\frac{\pi}{P}} \cdot \sqrt{H} - \lambda\alpha = 0,$$

рѣшая это уравненіе относительно H, получимъ:

$$H = \sqrt{\lambda\alpha + x^2} - \sqrt{\sqrt{2x}.\sqrt{x^2 + \lambda\alpha} - x^2}\,, \text{ гдѣ}$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{m^3}{16} + \sqrt{\left(\frac{\lambda\alpha}{3}\right)^3 + \left(\frac{m^2}{16}\right)^2}} +$$

$$+ \sqrt[3]{\frac{m^3}{16} - \sqrt{\left(\frac{\lambda\alpha}{3}\right)^3 + \left(\frac{m^2}{16}\right)^2}} \text{ гдѣ } m = \frac{1}{2}\,\alpha.\,a.\,\delta_1 \sqrt{\frac{\pi}{P}}.$$

Замѣтимъ далѣе, что резервуары, для которыхъ $\delta > \delta_1$ при $\delta_1 = {}^3/_{16}''$ не могутъ имѣть вмѣстимости меньше 20.000 кубическихъ футъ. При выраженіи всѣхъ величинъ въ дюймахъ, мы будемъ имѣть, полагая $\lambda = \frac{1}{4}''$, $a = 48''$, что $\lambda\alpha = 75000$ $\left(\frac{\lambda\alpha}{3}\right)^3 = 15625000000000$ и $m = 100$ для самаго невыгоднаго случая, т. е. для $P = 20.000$. При такихъ цифрахъ трудно даже опредѣлить величину x, такъ какъ она очень близка къ нулю, по этому можно, почти безошибочно, положить $x = o$ и тогда $H = \sqrt{\lambda\alpha}$.

Истинное количество желѣза при такомъ H будетъ:

$$Q = \left\{ 2\sqrt{\lambda\alpha} + \frac{a}{\alpha}\sqrt{\frac{\pi}{P}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\lambda\alpha}} \cdot a.\delta_1 \right\} P + \pi(\delta_1)^2 \alpha.$$

Откинутый нами въ уравненіи II членъ $\sqrt{\frac{\pi}{P}}\frac{1}{\sqrt[4]{\lambda\alpha}}.a.\delta_1$ на столько незначителенъ, что его не стоитъ принимать въ разсчетъ при опредѣленіи вѣса резервуара, тѣмъ болѣе, что при проектированіи резервуара трудно избѣжать погрѣшности въ распредѣленіи толщины желѣза послѣдовательныхъ колецъ, а такая погрѣшность всегда увеличиваетъ вѣсъ резервуара.

Такимъ образомъ для случая $\delta > \delta_1$, т. е. въ случаѣ резервуаровъ, въ стѣнкахъ которыхъ существуетъ измѣненіе толщины желѣза пропорціональное дѣйствующимъ усиліямъ, размѣры опредѣляются изъ уравненія I и вѣсъ употребленнаго на нихъ желѣза не долженъ превосходить величины, опредѣляемой уравненіемъ II, при чемъ:

Уравненіе I показываетъ, что *всѣ раціонально построенные резервуары, т. е. удовлетворяющіе условію mіnіmum'а, употребленнаго на ихъ устройство желѣза, должны быть одинаковой высоты, которая зависитъ отъ даваемой практикой толщины желѣза дна и крыши и отъ коэффиціента прочнаго сопротивленія, допускаемаго въ желѣзѣ, т. е. отъ доброкачественности послѣдняго.*

Уравненіе II показываетъ, что *объемъ желѣза, а слѣдовательно и вѣсъ его, удовлетворяющій условію mіnіmum, пропорціоналенъ вмѣстимости P резервуара, при чемъ, независимо отъ этой вмѣстимости, въ каждомъ резервуарѣ прибавляется одно и тоже количество безполезнаго для сопротивленія усиліямъ матеріала, выражающееся величиною* $\pi(\delta_1)^2\alpha$.

Такъ напр., если два раціонально устроенныхъ резервуара, каждый вмѣстимостью P к. ф. замѣнить однимъ, вмѣстимостью $2P$ к. ф. то при этомъ выгадывается количество матеріала $\pi(\delta_1)^2\alpha$. Зная величину этой выгоды, легко найти предѣлъ, за которымъ увеличеніе размѣровъ резервуара теряетъ всякое значеніе, если принять во вниманіе практическія неудобства, сопровождающія клепку, чеканку и опусканіе днищъ резервуаровъ большихъ размѣровъ.

Для отысканія наивыгоднѣйшихъ размѣровъ резервуаровъ, имѣющихъ однообразную толщину стѣнокъ по всей высотѣ, слѣдуетъ въ уравненіи 1-мъ положить $\delta = \delta_1 =$ постоян: и $H = H_1$

тогда имѣемъ:

$$Q = \pi R^2\lambda + 2\,\pi R H \delta_1 \text{ или}$$

$$Q = P\frac{\lambda}{H} + 2\,\sqrt{P\pi H}.\,\delta_1$$

для опредѣленія minimum Q, приравниваемъ первую производную Q по H нулю, имѣемъ:

$$\frac{dQ}{dH} = -P\frac{\lambda}{H^2} + \sqrt{P\pi}\,\delta_1\frac{1}{\sqrt{H}} = 0$$

$$\text{откуда } H = \sqrt[3]{\frac{P}{\pi}\frac{\lambda^2}{\delta_1^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{(III)}$$

$$\text{и } R = \sqrt[3]{\frac{P}{\pi}\frac{\delta_1}{\lambda}}.$$

Слѣдовательно въ резервуарахъ съ однообразной толщиной стѣнокъ, т. е. подчиняющихся условію $\delta_1 > \frac{RH}{\alpha}$, должно существовать отношеніе $\frac{H}{R} = \frac{\lambda}{\delta_1}$ для того, чтобы количество употребленнаго на нихъ желѣза было наименьшее.

Эта величина наименьшаго количеста желѣза будетъ:

$$Q = 3\sqrt[3]{\pi(\delta_1)^2\lambda}\cdot\sqrt[3]{P^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{(IV)}$$

Уравненіе IV показываетъ, что въ резервуарахъ, для которыхъ $\delta_1 > \frac{RH}{\alpha}$, наивыгоднѣйшее количество желѣза пропорціально $P^{\frac{2}{3}}$.

Предѣльный объемъ резервуаровъ, подлежащихъ послѣднему разсчету опредѣляется слѣдующимъ образомъ:

Для предѣльнаго объема должны существовать равенства

$$\delta_1 = \frac{RH}{\alpha} \text{ и } \frac{H}{R} = \frac{\lambda}{\delta_1}$$

опредѣляя отсюда H и R и внося ихъ величины въ выраженіе $P = \pi R^2 H$, будемъ имѣть:

$$\text{(V)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad P = \pi\delta_1^2\sqrt{\frac{\alpha^3}{\lambda}}$$

и высота такого резервуара будетъ

$$H = \sqrt{\alpha\lambda}.$$

Такимъ образомъ мы видимъ, что во всѣхъ раціонально устроенныхъ резервуарахъ высота ихъ сперва возрастаетъ пропорціонально корню кубическому изъ P до предѣльнаго объема, выражаемаго уравненіемъ V, послѣ чего, несмотря на возрастаніе вмѣстимости резервуаровъ, высота должна оставаться постоянною. Уравненія I, II, III, IV и V могутъ рѣшить элементарно всѣ вопросы, относящіеся до резервуаровъ, если даны значенія δ_1 и λ.

Инж. Шуховъ.

(Продолженіе слѣдуетъ).

МЕХАНИЧЕСКІЯ СООРУЖЕНІЯ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

*(Продолженіе *).*

Въ предъидущихъ выводахъ мы сдѣлали предположеніе, что толщина желѣза нижняго кольца резервуара опредѣляется уравненіемъ $\delta = \frac{RH}{a}$, гдѣ H есть полная высота резервуара. Такое предположеніе не совсѣмъ вѣрно, такъ какъ очевидно, что днище и его угольникъ вліяютъ на сопротивленіе нижняго кольца и вліяніе ихъ оказывается въ томъ, что поясъ наибольшаго напряженія въ желѣзѣ отклоняется вверхъ и величина этого напряженіи, а слѣдовательно толщина желѣза нижняго кольца должна опредѣляться уравненіемъ $\delta = \frac{R(H-x)}{a}$, гдѣ x соотвѣтствуетъ нѣкоторой величинѣ, опредѣляющей наиболѣе напряженный элементъ нижняго кольца. Для того, чтобы опредѣлить величину x, необходимо разсмотрѣть условія сопротивленія нижняго кольца въ связи съ угольникомъ и днищемъ тѣмъ усиліямъ, которыя вызываются давленіемъ налитой жидкости.

Когда резервуаръ наполненъ жидкостью, то радіусъ цилиндрической поверхности его стѣнъ получаетъ нѣкоторое увеличеніе вслѣдствіе растяженія матеріала, подверженнаго усиліямъ. Вліяніе днища и нижняго угольника препятствуютъ этому удлиненію матеріала стѣнокъ, и можно сдѣлать предположеніе, что дно резервуара вмѣстѣ съ приклепаннымъ къ нему угольникомъ не подвергаются никакимъ измѣненіямъ послѣ нагрузки резервуара, такъ какъ радіальныя усилія, передающіяся отъ стѣнокъ къ дну слишкомъ не-

---

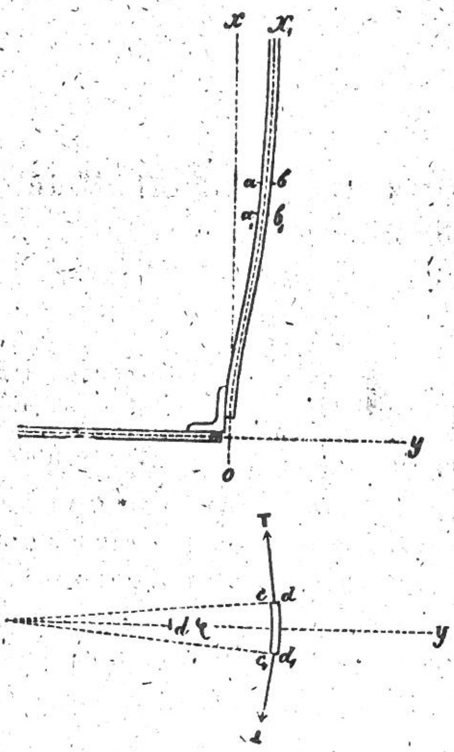
*) См. «Инженеръ», ж. м. п. с., 1883 г., т. III, кн. 13.

«Инженеръ», ж. м. п. с. 1883, т. III, кн. 14.

значительны для того, чтобы произвести радіальное же удлиненіе въ массѣ металла, составляющаго дно и нижній угольникъ.

Пусть на фиг. 2 обозначаетъ:

Черт. 2.



ox — среднюю цилиндрическую поверхность стѣнокъ резервуара до налива въ него жидкости.

ox_1 — видоизмѣненіе этой цилиндрической поверхности послѣ налива жидкости въ резервуаръ.

R — радіусъ нижняго кольца резервуара.

δ — толщину его стѣнокъ.

H — высоту резервуара.

Возьмемъ за оси координатъ ox и oy и разсмотримъ усилія, дѣйствующія на б. м. элементъ $ab\,a'b'$ $cd\,c'd'$.

Объемъ элемента будетъ: — $\delta.\,Rd\varphi.\,dx$.

S и $(S + dS)$ слагающія напряженія срѣза дѣйствующихъ на элементъ силъ параллельно оси oy.

T — слагающая напряженія разрыва дѣйствующихъ на элементъ силъ.

$p = (H - x)\,\gamma$ давленіе жидкости, гдѣ γ вѣсъ кубической единицы жидкости.

Въ виду того, что δ незначительно по отношенію къ R, мы можемъ принять, что напряженіе матеріала одинаково во всѣхъ точкахъ элемента.

Силы, дѣйствующія на разсматриваемый нами элементъ въ направленіи oy, будутъ, принимая $Sin\ d\varphi = d\varphi$:

$$pRd\varphi.\,dx - dS.\,\delta.\,Rd\varphi - T.\,\delta.\,dx.\,d\varphi = o$$

откуда

$$(2)\ldots\ldots\ldots\ pR = (H - x).\,\gamma.\,R = \delta.\,R\,\frac{dS}{dx} + T.\,\delta.$$

Такъ какъ напряженіе разрыва равняется удлиненію матеріала, помноженному на коэффиціентъ упругости, то въ уравненіи 2-омъ

$$T = E\frac{y}{R}, \text{ гдѣ } E \text{—коэффиціентъ упругости.}$$

Условіе равновѣсія моментовъ даетъ:

Моментъ силъ упругости, развиваемыхъ въ элементѣ, будетъ:

$$E\frac{\delta^3}{12}.R\,d\varphi\frac{1}{\rho} - E\frac{\delta^3}{12}.R\,d\varphi\left(\frac{1}{\rho} + d\left(\frac{1}{\rho}\right)\right) = -E\frac{\delta^3}{12}.Rd\varphi d\left(\frac{1}{\rho}\right),$$

гдѣ ρ — радіусъ кривизны.

Моментъ внѣшнихъ силъ $\rho.\delta.Rd\Theta.dx.$; отсюда имѣемъ, принимая, какъ это дѣлается въ выводахъ сопротивленія матеріаловъ, $\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2}$

$$E\frac{\delta^3}{12}.R.\frac{d^3y}{dx^3} = -\rho.R.\delta.$$

Дифференцируя обѣ части равенства и внося величину $\frac{ds}{dx}$ изъ уравненія (2), получимъ:

$$E\frac{\delta^3}{12}.R.\frac{d^4y}{dx^4} = -(H-x)\gamma.R + E\frac{y}{R}\delta. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Для интегрированія этого уравненія дадимъ ему слѣдующій видъ:

$$\frac{d^4y}{dx^4} = -\frac{12}{\delta^2R^2}\left\{(H-x)\frac{\gamma R^2}{E\delta} - y\right\}$$

и обозначивъ $\sqrt[4]{\frac{12}{4\delta^2R^2}} = \frac{\sqrt[4]{3}}{\sqrt{\delta R}} = f$

будемъ имѣть чрезъ интегрированіе:

$$y=(H-x)\frac{\gamma R^2}{E\delta} - e^{fx}(C\cos.fx + C_{,}\sin.fx) - e^{fx}(C_{,,}\cos fx + C_{,,,}\sin fx), (4)$$

гдѣ C, $C_{,}$, $C_{,,}$ и $C_{,,,}$ четыре постоянныхъ.

Для опредѣленія этихъ постоянныхъ замѣтимъ слѣдующее: что при $x = o \ldots y = o$ и $\frac{dy}{dx} = o$, такъ какъ мы предполагаемъ что ободъ днища резервуара остается неподвижнымъ.

При $x = H$, т. е. въ вершинѣ резервуара, имѣемъ также $y = o$.

Эти условія дадутъ уравненія, опредѣляющія четыре постоянныхъ:

условіе $x = o, y = o$ дастъ $H\frac{\gamma R^2}{E\delta} = C + C_{,,}$. . . . . . a

условіе $x = o, \frac{dy}{dx} = o$ дастъ $C_{,,} - C = C_{,} + C_{,,,} + \frac{\gamma r^2}{E\delta f}$ . . b

условіе $y = o$ при $x = H$ даетъ слѣдующее уравненіе:

$$e^{fH}(C \cos fH + C_{,} \sin fH) + e^{-fH}(C_{,,} \cos fH + C_{,,,} \sin fH) = o$$

или

$$(C e^{fH} + C_{,,} e^{-fH}) \cos fH + (C_{,} e^{fH} + C_{,,,} e^{-fH}) \sin fH = o;$$

это уравненіе распадается на два:

c. . . . . $C e^{fH} + C_{,,} e^{-fH} = o$

d. . . . . и $C_{,} e^{fH} + C_{,,,} e^{-fH} = o$

Замѣтимъ, что e^{-fH} есть очень малая величина, а поэтому безъ особой погрѣшности можно принять, что $C_{,,} e^{-fH} = o$ и $C_{,,,} e^{-fH} = o$, а слѣдовательно и $C = o$ и $C_{,} = o$; эти условія даютъ намъ изъ уравненія a

$$C_{,,} = H \frac{\gamma R^2}{E\delta}$$

и изъ уравненія b. $C_{,,,} = \frac{\gamma R^2}{E\delta}\left(H - \frac{1}{f}\right)$.

Вносся найденныя постоянныя въ уравненіе 4, будемъ имѣть:

$$y = (H - x)\frac{\gamma R^2}{E\delta} - e^{-fx}\frac{H\gamma R^2}{E\delta} \cos fx - e^{-fx}\left(\frac{H\gamma R^2}{E\delta} - \frac{\gamma R^2}{E\delta f}\right) \sin fx$$

или $y = \frac{\gamma R^2}{E\delta}\left\{H - x - He^{-fx}\left(\cos fx + \left(1 - \frac{1}{Hf}\right)\sin fx\right)\right\}$.

Чтобы неусложнять вычисленіе, можно откинуть величину $\frac{1}{fH}$ въ коэффиціентѣ, стоящемъ передъ $\sin fx$, такъ какъ H гораздо больше $\frac{1}{f}$, тогда будемъ имѣть окончательно

(5) . . . . . . $y = \frac{\gamma R^2}{E\delta}\left\{H - x - e^{-fx} H(\cos fx + \sin fx)\right\}$.

Дифференцируя это уравненіе по x, будемъ имѣть:

$$\frac{dy}{dx} = f\frac{\gamma R^2}{E\delta}\left\{-\frac{1}{f} + 2e^{-fx}. H. \sin fx\right\},$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 2f^2\frac{\gamma R^2}{E\delta} He^{-fx}(\cos fx - \sin fx) \text{ и}$$

(6). . . . $\frac{d^3y}{dx^3} = -4f^3 H \frac{\gamma R^2}{E\delta} e^{-fx} \cos fx.$

Уравненія 5 и 6 вполнѣ рѣшаютъ вопросъ объ усиліяхъ срѣза и растяженіи въ нижнемъ кольцѣ и нижнемъ угольникѣ резервуара.

Мы имѣли, что напряженіе желѣза по параллели есть

$$T = \frac{Ey}{R} = \frac{\gamma R}{\delta}\left\{H - x - e^{-fx} H(\cos. fx + \sin. fx)\right\}. \quad . \quad . \quad (7)$$

и напряженіе матеріала отъ срѣзывающихъ усилій

$$S = -E\frac{\delta^2}{12}\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{\delta}{8}f^3H\gamma R^2 e^{-fx}\cos.fx$$

но $f^3 = \frac{\sqrt[4]{3^3}}{\sqrt{\delta^3 R^3}}$, слѣдовательно:

$$S = -\frac{H\gamma}{\sqrt[4]{3}}\sqrt{\frac{R}{\delta}}\,.\,e^{-fx}\cos fx \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Уравненіе 7-е показываетъ, что напряженіе желѣза, а слѣдовательно и толщина его, соотвѣтствующая прочному сопротивленію, въ нижнемъ кольцѣ будетъ меньше, чѣмъ мы полагали, при выводѣ наивыгоднѣйшихъ размѣровъ резервуара, а именно—мы приняли:

$$\delta = \frac{HR}{a} = \frac{H\gamma R}{T} \text{ или } T = \frac{H\gamma R}{\delta}.$$

Въ дѣйствительности при $x = o$, т. е. около днища, напряженіе разрыву $T = o$ и матеріалъ испытываетъ только напряженіе срѣза S, которое значительно меньше величины $\frac{H\gamma R}{\delta}$. Далѣе, начиная отъ днища и идя къ верху, т. е. давая x постепенное приращеніе, можно видѣть, что величина T будетъ меньше $\frac{\gamma R}{\delta}(H - x)$ до нѣкотораго значенія $x = h$, при которомъ $\cos fx + \sin fx$ обращается въ o, и уже за этой точкой можно принять, что величина T будетъ соотвѣтствовать силѣ давленія жидкости. Что касается до напряженія S, то оно, какъ это видно изъ уравненія (8), быстро падаетъ, если давать x постепенныя приращенія.

Вопросъ долженъ сводиться къ опредѣленію, на основаніи уравненія 7-го, съ достаточною для практики точностью значенія δ подъ условіемъ, чтобы величина T равнялась прочному сопротивленію матеріала. Точное рѣшеніе этого вопроса невозможно, такъ какъ f есть функція δ; путь же достаточно приближеннаго рѣшенія помощію послѣдовательныхъ подстановокъ сопровождается сложными вычисленіями. Въ самомъ дѣлѣ: принимая δ за постоянное опредѣленное изъ $\delta = \frac{HR}{a}$, мы получимъ, что наибольшее значеніе T будетъ при x опредѣленномъ изъ уравненія $\frac{dT}{dx} = o$, что даетъ

$$(9) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \sin fx\,.\,e^{-fx} = \frac{1}{2Hf};$$

при этомъ $\frac{d^2T}{dx^2} = -1 + ctg\, fx$ всегда отрицательно въ предѣлахъ отъ $fx = \frac{\pi}{4}$ до $fx = \pi$, а слѣдовательно T будетъ maximum при такихъ значеніяхъ $\frac{d^2T}{dx^2}$. Рѣшеніе трансцендентнаго уравненія (9) можетъ быть получено путемъ послѣдовательныхъ подстановокъ.

Положимъ, что по даннымъ величинамъ P, λ и δ, и опредѣленнымъ изъ нихъ значеніямъ H, R и δ отыскано послѣдовательными подстановками рѣшеніе уравненія (9). Пусть это рѣшеніе будетъ $x = h$; тогда наибольшее напряженіе разрыву будетъ

$$T = \frac{\gamma R}{\delta}\left\{H - h - e^{-fh} H (\cos fh + \sin fh)\right\};$$

изъ этого уравненія можно опредѣлить, оставляя неизмѣннымъ f, величину $\delta = \delta_0$ подъ тѣмъ условіемъ, чтобы T равнялось прочному сопротивленію; зная δ_0, можно опредѣлить f_0 и внеся обѣ эти величины въ уравненіе 7-ое, надо будетъ отыскать новое значеніе $x = h_0$ для полученія наибольшаго T, послѣ чего тѣмъ же путемъ придется отыскивать новую величину $\delta = \delta_0'$, и такъ дѣлать до тѣхъ поръ пока не получатся два рѣшенія для δ, очень близкихъ между собою. Для приближеннаго рѣшенія можно будетъ ограничиться второю величиною, т. е. δ_0', но во всякомъ случаѣ путь этотъ долгій.

Гораздо проще получится рѣшеніе достаточное для практическихъ расчетовъ, если опредѣлить — насколько наибольшее значеніе T отклоняется отъ того, которое соотвѣтствуетъ $T = \frac{\gamma R}{\delta}\left\{H - x\right\}$, гдѣ x опредѣляется изъ уравненія

$$e^{-fx} H (\cos fx + \sin fx) = o.$$

Первое рѣшеніе этого уравненія

$$fx = \frac{3}{4}\pi = \text{приблизительно } 2{,}3.$$

Цѣлымъ рядомъ вычисленій можно убѣдиться, что maximum T отступаетъ не болѣе какъ на 2% отъ рѣшенія, полученнаго этимъ путемъ для резервуаровъ, не превосходящихъ 200000 кубич. фут. емкости, и потому съ совершенно достаточной для практики точностью можно дать формулу опредѣленія δ въ слѣдующемъ видѣ:

$$\delta = \frac{\left(H - \frac{2{,}2}{f}\right) R}{\alpha},$$

гдѣ f опредѣляется

по $\delta = \frac{HR}{\alpha}$, такъ что $f = \frac{\sqrt[4]{3}}{\sqrt{\delta R}} = \frac{\sqrt[4]{3}\sqrt{\alpha}}{R\sqrt{H}}$

и окончательно

(10). . . . . . . $\delta = \left(H - 1{,}66 \frac{R\sqrt{H}}{\sqrt{\frac{\alpha}{}}}\right)\frac{R}{\alpha}$.

Что касается до толщины остальныхъ колецъ, то ее слѣдуетъ расчитывать, не принимая во вниманіе дѣйствіе перекрышекъ, т. е. по формулѣ $\delta = (H - h)\frac{R}{\alpha}$, гдѣ h есть разстояніе разсматриваемаго кольца до днища.

Вліяніе, оказываемое перекрышками на сопротивленіе листовъ, очень незначительно; оно можетъ быть разсмотрѣно тѣмъ же путемъ, какой былъ выбранъ нами при разсмотрѣніи вліянія днища. Уравненіе въ этомъ случаѣ получится тоже самое, т. е. (4), но для опредѣленія постоянныхъ придется имѣть дѣло съ очень сложными уравненіями, которыя могутъ быть только рѣшаемы въ частныхъ случаяхъ, пользуясь незначительностью нѣкоторыхъ числовыхъ коэффиціентовъ.

Если наивыгоднѣйшіе размѣры резервуара опредѣлять, принимая во вниманіе значеніе δ, даваемое уравненіемъ (10), то отступленіе отъ величины H, даваемой уравненіемъ I, будетъ настолько незначительнымъ, что его даже нельзя указать на численномъ примѣрѣ, а потому наивыгоднѣйшая высота останется тою же.

Значеніе уравненія 10 выражается въ томъ, что оно даетъ вѣсъ нижняго кольца въ среднемъ на 9% меньше.

Пояснимъ примѣрами употребленіе вышеприведенныхъ формулъ.

Такъ какъ, при запросѣ на резервуары, нефтепромышленники предъявляютъ свои данныя для емкости резервуаровъ въ куб. футахъ или пудахъ нефти, кромѣ того, на нашемъ желѣзномъ рынкѣ размѣры желѣза обозначаются въ дюймахъ, то мы даемъ примѣры употребленія формулъ съ цѣлью непосредственнаго ихъ практическаго приложенія въ футахъ и дюймахъ.

Построенный резервуаръ испытывается наливомъ его водою, и потому мы примемъ давленіе, производимое столбомъ нефти, равнымъ давленію такого же столба воды.

Примемъ коэффиціентъ прочнаго сопротивленія $T = 300$ пуд. на квадр. д.

Вѣсъ кубическаго дюйма воды 0,001 пуда и потому коэффиціентъ $\alpha = \frac{300}{0{,}001} = 3.10^5$.

Толщина желѣза днища берется въ большинствѣ случаевъ въ $^3/_{16}''$, что совершенно достаточно для плотной склепки и чеканки и для полной надежности сохраненія швовъ при опусканіи днищъ самыхъ большихъ резервуаровъ. Толщина желѣза крыши берется, въ большинствѣ случаевъ, не больше $^1/_{16}''$.

Если взять:

$\lambda = {}^3/_{16}'' + {}^1/_{16}''$, то наивыгоднѣйш. высота $H = \sqrt{\lambda a} = 274'' = 22{,}83'$
$\lambda = {}^3/_{16}'' + {}^1/_8''$ „ „ „ $H = 25{,}6'$
$\lambda = {}^1/_4'' + {}^1/_8''$ „ „ „ $H = 28'$

δ_1 въ большинствѣ случаевъ берется равнымъ $^3/_{16}''$ и $^5/_{32}''$ и рѣдко $^1/_8''$.

Ширина листовъ, составляющихъ кольца резервуара, берется обыкновенно равной $48''$.

Когда дана вмѣстимость резервуара, то сперва слѣдуетъ выбрать λ и δ_1, и затѣмъ, если данная вмѣстимость больше той, которая дается уравненіемъ (V), то опредѣлить высоту по формулѣ I, т. е. $H = \sqrt{\lambda a}$; если же данная емкость меньше величины, опредѣляемой уравненіемъ (V), то высоту слѣдуетъ отыскивать по уравненію III.

Въ случаѣ принятаго нами коэффиціента прочнаго сопротивленія въ 300 пудовъ на квадратный дюймъ, уравненіе V приметъ видъ:

$$P_e = 290000\,\delta_1^2 \sqrt{\frac{1}{\lambda}},$$

гдѣ P въ куб. футахъ, λ и δ_1 въ дюймахъ. Если положить напр.: $\delta_1 = \frac{3}{16}''$ и $\lambda = \frac{1}{4}''$, то предѣльный объемъ

$$P_e = 20000 \text{ куб. фут.}$$

Вѣсъ желѣза, входящаго въ составъ резервуаровъ, имѣющихъ вмѣстимость больше P_e, не долженъ превосходить того, который дается уравненіемъ II.

Принимая вѣсъ кубическаго фута желѣза въ 13,3 пуда, будемъ имѣть, что вѣсъ резервуаровъ въ случаѣ прочнаго сопротивленія 300 пудовъ долженъ быть

$$\Pi = 13{,}3\ Q = (0{,}046\sqrt{\lambda} + 0{,}00213)\,P + 7300\,\delta_1^2 \text{ пудовъ},$$

гдѣ P вмѣстимость въ кубическихъ футахъ, а λ и δ_1 въ дюймахъ; такъ напр. при $\lambda = \frac{1}{4}$ и $\delta_1 = \frac{3}{16}''$.

$$\Pi = 0{,}02513\,P + 257.$$

Къ опредѣленному, такимъ образомъ, вѣсу надо прибавить 10%, которые идутъ на угольники, перекрышки и заклепки. Исправленный такою прибавкою вѣсъ въ случаѣ

$\lambda = {}^1/_4{}''$ и $\delta_1 = {}^3/_{16}{}''$ будетъ $П = 0,028\ P + 282$

$\lambda = {}^7/_{32}{}''$ и $\delta_1 = {}^3/_{16}{}''$ „ $П = 0,024\ P + 282$

$\lambda = {}^7/_{32}{}''$ и $\delta_1 = {}^5/_{32}{}''$ „ $П = 0,024\ P + 200$

Толщина стѣнокъ нижняго кольца будетъ опредѣляться по формулѣ (10), которая при $\alpha = 3.10^5$ принимаетъ видъ:

$\delta = (H - 0,003\ R \sqrt{H}) \frac{R}{\alpha}$, гдѣ δ, H и R въ дюймахъ. Найденную въ этомъ уравненіи величину δ слѣдуетъ вставить въ уравненіе 7-ое для того, чтобы узнать удовлетворяется ли условіе прочнаго сопротивленія при наибольшемъ T.

Вѣсъ желѣза резервуаровъ, имѣющихъ вмѣстимость меньшую P_e, опредѣляется уравненіемъ IV, которое въ случаѣ $\lambda = {}^1/_4{}''$ и $\delta = {}^3/_{16}$ даетъ:

$$13,3\ Q = П = \sqrt{P^2}$$ пудовъ, гдѣ P въ кубич. футахъ.

Къ опредѣленному по уравненію IV вѣсу для небольшихъ резервуаровъ надо прибавлять 15% на перекрышки, угольники и заклепки.

Намъ теперь остается разсмотрѣть условія наивыгоднѣйшихъ швовъ и указать на нѣкоторыя детали въ практикѣ сборки и установки резервуаровъ, что составитъ предметъ особой главы.

Инженеръ В. Шуховъ.

(Продолженіе слѣдуетъ).