جریان مایع برروی دیسک گردان

نوشتهٔ :

عنایت فروحی

مرکز تحقیقات قند و صنایع غذائی دانشکده صنعتی (پلی‌تکنیک تهران)

چکیده :

در این مقاله کوشش هائی که تاکنون برای حل معادلات حرکت مایع برروی دیسک گردان بعمل آمده دوره شده و روشی را که مارشال وهمکارانش برای مایعات نیوتنی بکار برده‌اند برای آن دسته از مایعات غیر نیوتنی که از قانون توان تبعیت میکنند تعمیم داده شده است . بمنظور بدست آوردن رابطه‌ای برای ضخامت فیلم برحسب شعاع ، معادلات دیفرانسیل حاصل به روش Runge – Kutta بکمک کامپیوتر IBM370/115 دانشکده صنعتی (پلی‌تکنیک تهران) حل گردید . در پایان مقاله مروری برروش های تجربی اندازه گیری ضخامت فیلم مایع برروی دیسک گردان بعمل آمده است .

۱ـ مقدمه

در صنایع غذائی و بیوشیمیائی برای خشک کردن مایعاتی که نسبت به گرما حساس هستندمانند شیر ، قهوه ، پلاسماو داروها ، آنها را در مجاورگاز (هوا) خشک کن اتمیزه کرده و بصورت پودر بدست میاورند. این روش مزیت‌های زیادی برروش معمولی خشک کردن دارد. سطح حرارتی و ضریب انتقال حرارت زیاد بوده و در نتیجه زمان خشک شدن کم و در حدود چند ثانیه میباشد. بعلاوه درجه حرارت قطره همیشه از درجه حرارت Wet bulb گاز خشک کن پائین تر است. بنابراین این فرآیند وسیله خوبی برای خشک کردن مایعاتی که در درجات حرارت بالا تجزیه میشوند میباشد(۱).

اتمیزه کننده‌های مختلفی دراین روش بکار میرود. از مهمترین آنها اتمیزه کننده‌های گردان هستند که درآنها مایع وارد شده برسطح گردان بوسیته نیروی گریز از مرکز پخش می‌شود. سطح گردان می‌تواند بشکل های مختلف باشد. ساده‌ترین آن دیسک مسطح می‌باشد.

۲ـ جریان فیلمی بروی سطح گردان

مایع وارد شده برروی دیسک مسطح بصورت فیلمی با ضخامت کم پخش شده و برحسب اینکه مقدار سرعت جریان چقدر باشد گاهی تا خارج از دیسک هم ادامه پیدا کرده و سپس به قطرات ریزتجزیه

می‌شود. ماکزیمم قطر قطرات متناسب با ضخامت فیلم است[۲]. برای بررسی تئوریک فیلم لازمست که معادلات حرکت مایع را حل کرد ولی این معادلات پیچیده بوده (بخصوص در مورد مایعات غیر نیوتنی) و بنابراین لازمست با درنظرگرفتن چند فرض و حذف چند جمله معادلات را بصورت ساده‌تری درآورد.

۱-۲- مایعات نیوتنی

Emsile[۳] و Yurchenko[۴] و همکارانشان معادله حرکت مایع در جهت شعاع را در مختلف استوانه‌ای (r, θ, z) بصورت:

$$-\mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} = \rho \omega^2 r \qquad (1)$$

نوشته و رابطه زیر را که تغییر ضخامت فیلم برحسب شعاع را نشان میدهد بدست آورده‌اند.

$$h = \left(\frac{3\mu q}{2n\rho\omega^2 r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \qquad (2)$$

در این رابطه ω = سرعت زاویه‌ای

ρ = دانسیته

V_r = سرعت شعاعی

μ = ویسکوزیته

h = ضخامت فیلم

و q = سرعت جریان مایع

Venkatarman[۵] و Marshall وهمکارش[۶] بادرنظرگرفتن نیروی اینرسی معادله‌حرکت را در جهت شعاعی بصورت:

$$\rho V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{\rho V_\theta^2}{r} = \mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \qquad (3)$$

نوشته و با تغییراتی رابطه زیر را بدست آوردند:

$$\rho \frac{d(V_{rav})}{dt} + \frac{12\pi^2\mu}{q^2} r^2 (V_{rav})^3 - \rho r \omega^2 = 0 \qquad (4)$$

با بکار بردن $V_{rav} = dr / dt$ رابطه (۴) را بصورت:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{12\pi^2\mu}{q^2\rho} r^2 (dr / dt)^3 - r\omega^2 = 0 \qquad (5)$$

درآورده و به روش آنالیز عددی بکمک کامپیوتر آنرا حل کردند. ضخامت فیلم از روی رابطه:

$$h = q / (2\pi r V r_{av})$$

بدست میآید. در این رابطه‌ها V_θ مؤلفه مماسی سرعت و V_{rav} سرعت شعاعی متوسط میباشد.

Venkatarman[6] با درنظر گرفتن نیروهای اینرسی و کوریولیس موازنه نیروها در جهت r و θ را بترتیب بصورت‌های :

$$\rho(2\pi r\cdot dr\cdot h)\frac{d(V_{rav})}{dt}-(2\pi r\cdot dr\cdot h)\rho(d\theta/dt)^2 r= -\mu(\partial V_r/\partial z)_{z=0}(2\pi r\cdot dr) \quad (6)$$

$$\rho(2\pi r\cdot dr\cdot h)\frac{d(V_{\theta av})}{dt}+(2\pi r\cdot dr\cdot h)\rho\left(\frac{V_{rav}\cdot V_{\theta av}}{r}\right)= -\mu(2\pi r\cdot dr)\left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z}\right)_{z=0} \quad (7)$$

نوشته و پس‌از تغییرات لازم و بکار بردن :

$$V_{\theta av}=r\cdot dr/dt \quad و \quad V_{rav}=dr/dt$$

آنها را بصورت زیر در آورده است :

$$\frac{d^2r}{dt^2}+Ar^2\left(\frac{dr}{dt}\right)^3-r\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2=0 \quad (8)$$

$$r\frac{d^2\theta}{dt^2}+2\frac{dr}{dt}\cdot\frac{d\theta}{dt}-Ar^2V^2_{rav}(r\omega-V_{\theta av})=0 \quad (9)$$

که در آنها :

$$A=\frac{12\pi^2\mu}{q\cdot\rho}$$

و $V_{\theta av}$ سرعت مماسی متوسط میباشد معادلات (۸) و (۹) بکمک :

$$Q=do/dt \quad و \quad P=dr/dt$$

به دو معادله دیفرانسیلی مرتبه یک تبدیل شده و همزمان با هم بکمک کامپیوتر حل شدند تا مؤلفه‌های شعاعی و مماسی و همچنین ضخامت فیلم بدست آیند.

Nickolaev و همکارانش[7] جریان مایع بروی یک دیسک مخروطی (زاویه رأس $=2\alpha$) را مورد بررسی قرار داده و معادلات حرکت را با حذف چند جمله در یک دستگاه مختصات مخروطی حل کردند. معادلات بدست‌آمده بوسیله این محققین را میتوان برای یک‌دیسک مسطح در مختصات استوانه‌ای بصورت زیر نوشت :

$$\begin{cases}\omega^2r+2\omega V_\theta-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial r}+\nu\frac{\partial^2V_r}{\partial z^2}=0 & (10)\\ -2V_r\omega+\nu\frac{\partial^2V_\theta}{\partial z^2}=0 & (11)\\ g-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial z}=0 & (12)\end{cases}$$

که در آنها p فشار و ν ویسکوزیته سینماتیک میباشد. از معادلات (۱۰) و (۱۲) رابطه زیر بدست‌می‌آید:

$$2\omega \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \nu \frac{\partial^3 V_r}{\partial z^3} = 0 \qquad (13)$$

و از معادلات (۱۱) و (۱۳) نیز رابطه زیر را بدست می‌آوریم:

$$\frac{\partial^4 V_r}{\partial z^4} + 4 V_r = 0 \qquad (14)$$

از حل این معادله V_r و با جاگذاری V_r درمعادله (۱۳) V_θ حاصل میشود:

$$\begin{aligned} V_r = & \, c_1 \cdot \cosh\beta \cdot \cos\beta + c_2 \cdot \cosh\beta \cdot \sin\beta \\ & + c_3 \cdot \sinh\beta \cdot \cos\beta + c_4 \cdot \sinh\beta \cdot \sin\beta \end{aligned} \qquad (15)$$

$$\begin{aligned} V_\theta = & \, c_1 \cdot \sinh\beta \cdot \sin\beta - c_2 \cdot \sinh\beta \cdot \cos\beta \\ & + c_3 \cdot \cosh\beta \cdot \sin\beta + c_4 \cdot \cosh\beta \cdot \sin\beta + c_5 \end{aligned} \qquad (16)$$

که در آن $\beta = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \cdot z$ و c_1 ، c_2 ، c_3 ، c_4 و c_5 ثابت هستند که از روی شرایط مرزی مندرج در زیر و رابطه $q = r \cdot h \cdot V_{rav}$ بدست می‌آیند:

در $\beta = 0$ $\qquad V_r = V_\theta = 0$

و:

در $\alpha = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \cdot h$ $\qquad p = p_0 \quad , \quad (\partial V_r / \partial\beta) = (\partial V_\theta / \partial\beta) = 0$

از رابطه (۱۲) نتیجه میشود که:

$$p = \rho g(z - h) + P_0 \qquad (17)$$

از این معادله و معادله (۱۰) با جاگذاری p ، V_r و V_θ رابطه‌ای برای ضخامت فیلم بدست می‌آید.

Rauscher و همکارانش[8] با حل کامل معادلات حرکت از طریق بسط، روابطی برای: V_r ، V_θ و V_z بدست آورده‌اند رابطه کامل طولانی میباشد ولی Charwat و همکارانش[10] روابط را برای ساده‌ترین حالات (یعنی برای سطح مایع) بصورت زیر نوشته‌اند:

$$\begin{aligned} V_r / \omega l = & \, r^{*-\frac{1}{3}} + (-0.111 + 0.222 g\nu / q\omega^2) \cdot r^{*-3} \\ & + O(r^{*-\frac{11}{3}}) \end{aligned} \qquad (18)$$

$$\begin{aligned} (V_\theta - \omega r) / \omega l = & -0.417 r^{*-\frac{5}{3}} + (-0.128 \\ & + 0.199 g\nu / q\omega^2) r^{*-\frac{13}{3}} + O(r^{*-5}) \end{aligned} \qquad (19)$$

$$\begin{aligned} V_z / (\omega\nu)^{\frac{1}{2}} = & \, r^{*-\frac{2}{3}} + (0.197 - 0.460 g\nu / q\omega^2) r^{*-\frac{10}{3}} \\ & + O(r^{*-4}) \end{aligned} \qquad (20)$$

که در آنها :

$$r^* = r / l$$

$$l = \left(\frac{9q^2}{4\pi^2 \times \nu\omega} \right)^{\frac{1}{4}}$$

O مرتبه‌ی مقداری جمله آخر را بیان میکند. این روابط توزیع سرعت را در سطح فیلم نشان میدهند. رابطه ضخامت فیلم هم بصورت زیر میباشد :

$$h/(\nu/\omega)^{\frac{1}{2}} = r^{*-\frac{2}{3}} + (0{,}197 - 0{,}0465 g\nu / q\omega^2) r^{*-\frac{19}{3}} + O(r^{*-4}) \qquad (21)$$

۲-۲- مایعات غیر نیوتنی

Vachagin و همکارانش(۹) برای یک مایع غیر نیوتنی که از قانون توان (Power – laW) تبعیت میکند معادله حرکت در جهت شعاع را بصورت زیر نوشته‌اند :

$$k \frac{\partial}{\partial z} \left[\left| \frac{\partial V_r}{\partial z} \right|^{n-1} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial z} \right] + \rho\omega^2 r = 0 \qquad (22)$$

که در آن k ثابت و n نما در قانون توان میباشد. انتگراسیون رابطه (۲۲) معادله زیر را بدست میدهد:

$$k \left[\left(\frac{\partial V_r}{\partial z} \right)^n \right] = -\omega^2 r \cdot z + c_1 \qquad (23)$$

با این شرط مرزی که اصطکاکی در سطح فیلم وجود ندارد (یعنی $\frac{V_r}{z} = 0$ در $z = h$) میتوان ثابت c_1 را پیدا کرد $c_1 = -\rho\omega^2 r \cdot h$ ، بنابراین :

$$\frac{\partial V_r}{\partial z} = \left[\frac{\rho\omega^2 r}{k} (h - z) \right]^{\frac{1}{n}} \qquad (24)$$

از انتگراسیون این رابطه نتیجه میشود :

$$V_r = -\frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho\omega^2 r}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot (h - z)^{\frac{n+1}{n}} + c_2 \qquad (25)$$

اما $V_r = 0$ در $z = 0$ ، پس میتوان c_2 را بدست آورد و بنابراین :

$$V_r = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho\omega^2 r}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left[(h)^{\frac{n+1}{n}} - (h - z)^{\frac{n+1}{n}} \right] \qquad (26)$$

و :

$$V_{rav} = \frac{1}{h} \int_0^h V_r \cdot dz = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\rho\omega^2 r}{k} \right)^{\frac{1}{n}} (h)^{\frac{n+1}{n}} \qquad (27)$$

اما $q=2\pi r.h.V_{rav}$ و بنابراین :

$$h=\left[\frac{2n+1}{n}\cdot\frac{q}{2\pi}\left(\frac{k}{\rho\omega^2}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot(1/r)^{\frac{n+1}{n}}\right]^{\frac{n}{2n+1}} \qquad (28)$$

آنچه در بالا گفتهٔ شده کوشش‌هائی است که محققین برای حل معادلات حرکت مایعات نیوتنی برروی دیسک گردان بعمل آورده‌اند. در اینجا سعی شده است تا روشی را که Marshall و دیگران(6) برای حل معادلات حرکت یک مایع نیوتنی بکار برده‌اند برای یک مایع غیر نیوتنی آزمایش شود. معادله حرکت در جهت r با فرض تقارن زاویه‌ای بصورت زیر خواهد بود :

$$\rho V_r\frac{\partial V_r}{\partial r}-\frac{\rho V^2_\theta}{r}=-\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} \qquad (29)$$

که در آن τ_{rz} تنش برشی میباشد. طبق قانون توان :

$$\tau_{rz}=-k\left(\frac{\partial V_r}{\partial z}\right)^n \qquad (30)$$

اگر گرادیان سرعت در جهت مماسی صفر باشد در اینصورت $V_\theta=\omega.r$ و بنابراین :

$$\rho V_r(\partial V_r/\partial r)-\rho r\omega^2=-(\partial\tau_{rz}/\partial z) \qquad (31)$$

و چون :

$$V_r=(dr/dt)$$

پس :

$$\rho(dV_r/dt)-\rho r\omega^2=-\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} \qquad (32)$$

از طرفین این رابطه درطول ضخامت فیلم انتگرال میگیریم :

$$\frac{\rho}{h}\int_0^h\frac{dV_r}{dt}\,dz-\rho\frac{r\omega^2}{h}\int_0^h dz=-\frac{1}{h}\int_0^h\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z}\,dz \qquad (33)$$

این رابطه را میتوان بصورت زیر هم نوشت :

$$\rho\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{h}\int_0^h V_z\cdot dz\right)-\rho r\omega^2=-\frac{1}{h}\int_0^h\frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z}\cdot dz \qquad (34)$$

یا :

$$\rho\frac{d}{dt}(V_{rav})-\rho r\omega^2=-\frac{1}{h}\int_0^h\frac{\partial\tau_{rz}}{z}\cdot dz \qquad (35)$$

و یا بااستفاده از رابطه (30) :

$$\rho\frac{d}{dt}(V_{rav})-\rho r\omega^2=\frac{k}{h}\int_0^h\left\{\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\frac{V_r}{z}\right)^n\right]\right\}\cdot dz \qquad (36)$$

از روابط (۲۶) و (۲۷) نتیجه میشود که :

$$V_r=\frac{2n+1}{n+1}\cdot V_{rav}\left[1-\left(1-\frac{z}{h}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right] \qquad (۳۷)$$

از طرفین این رابطه نسبت به z مشتق میگیریم :

$$\frac{\partial V_r}{\partial z}=\frac{2n+1}{n}\cdot\frac{V_{rav}}{h}\left(1-\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (۳۸)$$

و :

$$\left(\frac{\partial V_r}{\partial z}\right)^n=\left(\frac{2n+1}{n}\right)^n\cdot\left(\frac{V_{rav}}{h}\right)^n\cdot\left(1-\frac{z}{h}\right) \qquad (۳۹)$$

و :

$$\frac{\partial}{z\partial}\left[\left(\frac{\partial V_r}{\partial z}\right)^n\right]=-\left(\frac{2n+1}{n}\right)^n\cdot\frac{(V_{rav})^n}{h^{n+1}} \qquad (۴۰)$$

با جاگذاری رابطه (۴۰) در (۳۶) :

$$\rho\frac{d}{dt}(V_{rav})+k\left(\frac{2n+1}{n}\right)^n\frac{(V_{rav})^n}{h^{n+1}}-\rho r\omega^2=0 \qquad (۴۱)$$

و :

$$\frac{dV_{rav}}{dt}+\frac{2\pi k}{q\rho}\left(\frac{2n+1}{n}\cdot\frac{2\pi}{q}\right)^{n+1}\cdot r^{n+1}\cdot V_{rav}^{2n+1}-r\omega^2=0 \qquad (۴۲)$$

با تقریبی که مارشال و دیگران بکار بردهاند یعنی $V_{rav}=\frac{dr}{dt}$ این رابطه بصورت زیر درمیآید :

$$\frac{d^2r}{dt^2}+A.r^{n+1}\left(\frac{dr}{dt}\right)^{2n+1}-B.r=0 \qquad (۴۳)$$

که در آن :

$$A=\frac{2\pi k}{q}\left(\frac{2n+1}{n}\cdot\frac{2\pi}{q}\right)^{n+1} \quad و \quad B=\omega^2$$

در اینجا باید یادآوری شود که پس از حل معادله (۴۳) بوسیله کامپیوتر برای تعیین V_{rav} از همان رابطه $V_{rav}=\frac{dr}{dt}$ استفاده میکنیم. برای نشان دادن حل معادله (۴۳) یک مایع غیر نیوتنی مانند آب گوجه فرنگی (کل مواد جامد=۵٫۸٪ ، $n=0.09$ ، $k=2.2$ و $\rho=1.020\,gr/Cm$) درنظر گرفتهشد.

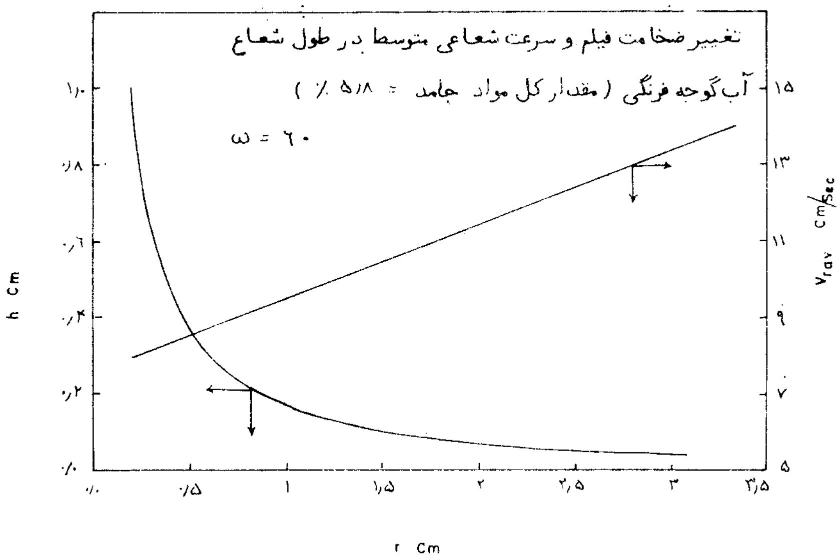
با فرض $q=10\,Cm/sec$ ، $\omega^2=3600$ رابطه (۴۳) بصورت زیر درمیآید :

$$\frac{d^2r}{dt^2}+4.22r^{1/09}\left(\frac{dr}{dt}\right)^{\frac{2}{18}}-3600r=0 \qquad (۴۴)$$

این معادله با شرایط مرزی زیر :

$$t=0 \qquad r_0=0.2 \qquad (dr/dt)_0=7.96 \qquad h=1$$

بکمک کامپیوتر IBM370/115 دانشکده صنعتی (پلی‌تکنیک تهران) به روش Runge—kutta حل گردید. جواب در شکل نشان داده شده است .



چنانکه دیده میشود سرعت شعاعی متوسط بطورخطی با r تغییر میکند و ضخامت فیلم در ابتداء بسرعت کم میشود. (مفهوم شرایط مرزی اینست که در شعاع ۲ر. سرعت شعاعی متوسط ۷٫۹٦Cm/sec بوده و ضخامت فیلم در همین شعاع یک سانتی‌متر میباشد . بوجود آوردن چنین شرایطی بطور عملی امکان پذیر است.)

معادله منحنی تغییرات V_{rav} برحسب r بصورت زیر بوده :

$$V_{rav} = ۱٫۹۲۵r + ۷٫٦۲ \qquad (۴۵)$$

و بنابراین از رابطه $q = ۲\pi r.h.V_{rav}$ معادله منحنی تغییرات h برحسب r بصورت زیر درخواهد آمد.

$$h = \frac{۰٫۸۲۷}{r(r + ۳٫۹٦)} \qquad (۴٦)$$

۳- روشهای اندازه‌گیری ضخامت فیلم .

۱-۳- اندازه‌گیری ضخامت فیلم برروی دیسک

الف - استفاده از مواد رادیوآکتیو[۱۲]

مقدار بسیار کمی از یک ماده رادیوآکتیو را در مایعی که باید برروی دیسک جریان یابد حل میکنند. سپس محلول را برروی دیسک بجریان درآورده و تشعشعات ماده رادیوآکتیو را بوسیله دستگاه گایگر - مولر ثبت می‌نمایند. مقدار آکتیویته ثبت شده بستگی به‌ضخامت فیلم دارد. رابطه بین آکتیویته ثبت شده و ضخامت فیلم بعلت جذب تشعشعات بوسیله فیلم مایع ، خطی نیست ، بهمین جهت‌اندازه‌گیری مستقیم امکان‌پذیر نمیباشد ، بلکه از روی نسبت شرایط دانسته شده و مجهول محاسبه می‌شود.

ب ـ استفاده از اندازه‌گیری مقاومت مایع [۱۳-۱۵]

ضخامت فیلم را با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی مایع موجود بین دو الکترد که به سطح دیسک چسبانده شده است اندازه میگیرند. با کالیبره کردن سیستم مقاومت اندازه‌گیری شده را میتوان مستقیماً به ارتفاع مایع بالای الکترد نسبت داد.

ج ـ روش میکرومتر [۵،۱۶،۱۷]

میکرومتر سوزن داری را در بالای دیسک آنچنان نصب میکنند که سوزن بطور قائم قرار گرفته و نوك آن به فاصله کمی از سطح دیسک باشد. سوزن میکرومتر را بوسیله یک سیم بطور سری به یک لامپ کوچک، میکروآمپر سنج و یک باطری وصل میکنند سر دیگر باطری نیز به تانک مایعی که برروی دیسک جریان می‌یابد متصل است. با پیچاندن دگمه میکرومتر سوزن را به آرامی پائین میآورند تا نوك آن باسطح دیسک تماس پیدا کند. به محض تماس چراغ روشن شده و پیچاندن دگمه را متوقف می‌نمایند سپس رقمی را که میکرومتر نشان میدهد یادداشت میکنند. پس از اینکار با پیچاندن دگمه، سوزن را بالا برده و مایع را برروی دیسک گردان جریان میدهند و سوزن را دوباره به آرامی پائین میآورند تا نوك آن باسطح آب تماس پیدا کند. به محض تماس و روشن شدن چراغ سوزن را متوقف و رقم میکرومتر را میخوانند. تفاوت دو رقم مذکور در بالا ضخامت فیلم را در نقطه مربوطه بدست میدهد. باید یادآور شد که این رقم ماکزیمم ضخامت در آن نقطه را میدهد.

د ـ روش کاپاسیتومتر [۵،۱۸،۱۹]

در این روش نیز از یک میکرومتر استفاده میشود منتها بجای سوزن یک میله فلزی با مقطعی به قطر کوچک در انتهای آن قرار دارد. طرز قرارگرفتن و حرکت آن همانست که در بند ج گفته شد. سطح این مقطع و سطح مقابل آن یعنی قسمتی از سطح دیسک یک کندانسور را بوجود میآورد که ظرفیت آن معکوساً متناسب باضخامت هوای موجود بین دو سطح است. وقتی مایع برروی دیسک جریان پیدا میکند ضخامت این هوا که محدود به سطح مایع و سطح مقطع میله میشود کمتر میگردد. اگر ظرفیت را با یک کاپاسیتومتر که قبلاً کالیبره شده اندازه بگیریم میتوانیم ضخامت فیلم را که معکوساً متناسب با ظرفیت است تعیین کنیم.

ن ـ روش جذب نور [۱۰]

درصورتیکه دیسک ازشیشه یاماده‌ی شفاف دیگری ساخته شده باشدمی‌توان باقراردادن یک منبع نور در بالا و فتوسل در پائین دیسک و کالیبره کردن واندازه‌گیری میزان جذب، ضخامت فیلم را بدست آورد.

و ـ روش دانسیته انعکاس [۲۰]

در این روش از روی اندازه‌گیری دانسیته انعکاس نور منعکس شده برروی فیلم مایع رنگین، ضخامت فیلم محاسبه میشود.

۲-۳- اندازه‌گیری ضخامت فیلم در خارج از دیسک

الف - روش فتومتریک

این روش براساس قانون لامبرت در مورد جذب نور بوسیله مواد شفاف میباشد. در این روش منبع نور در زیر فیلم مایع قرار دارد و نور عبور کرده از فیلم مایع به فیلم عکاسی که در بالای آن قرار دارد می‌تابد. میزان جذب نور بستگی به ضخامت فیلم دارد، بنابراین بوسیله کالیبراسیون و بااستفاده از قانون لامبرت ضخامت فیلم محاسبه میشود.

ب - روش تداخل سنجی[۲۱]

وقتی نور یک رنگی به فیلم مایع تابیده میشود مقداری از آن بوسیله سطح جلوئی و مقداری بوسیله سطح عقبی منعکس میشود. این دو نور منعکس شده باهم تداخل پیدا میکنند زیرادارای تفاوت در طول مسیر هستند. این تفاوت مستقیماً به ضخامت فیلم بستگی دارد. در این روش نور یک رنگ از منبع نور به فیلم تابیده شده و نورهای منعکس شده به فیلم عکاسی میتابد. با استفاده از قوالین تداخل سنجی و باندازه گیری ضخامت فیلم در لبه دیسک و از روی شماره خطوط تداخل ضخامت فیلم درهرنقطه تعیین میشود.

ج - روش جذب اشعهٔ β[۲۱]

دراین روش از میزان جذب اشعهٔ β بوسیله فیلم مایع ضخامت فیلم تعیین میشود. نقص این روش اینست که دستگاههای پیچیده‌ای احتیاج داشته و بعلاوه به تعداد زیادی اندازه‌گیری احتیاج دارد. تغییرات کوچک در ضخامت فیلم هم قابل کشف نیست.

مراجع

1. Dombrowski , N. (1968). In Biochemical and Biological Engineering Science , p. 209. Ed. N. Blakebrough. London , New York ; Academic Press.
2. Kamiya , T. and A. Kayano (1972). J. Chem. Engng. Japan , **5** , 174.
3. Emsile , A.G. etal. (1958). J. Appl. Phys. **29** , 858.
4. Yurchenko , V.A. , etal. (1969). Theo. Foundation Chem. Engng. (Teor. Osnovy Khim. Tekh.) , **3** , 341.
5. Venkatarman , R.S. (1966). PhD thesis , University of Leeds.
6. Alder , C.R. and W.R. Marshall (1951). Chem. Engng. Prog. , **47**, 515.
7. Nikolaev , V.S. etal. (1967). Internat. Chem. Engng. **7** , 595.
8. Rauscher , J.W. etal. (1973). J. Appl. Mech. **18** , 43.
9. Vachagin , K.D. etal. (1966). Internat. Chem. Engng. **6** , 228.
10. Charwat , A.F. , etal. (1972). J. Fluid Mech. , **53** , 227.
11. Coulson , F. M. and J. F. Lichardson (1971). Chemical Engineering , Chap. 4 , p. 320.
12. Jackson ، M.L. (1955). AICHE Journal , **1** , 231.
13. Van Rossum , J.J. (1959). Chem. Engng. Sci. , **11** , 35.
14. Haratty , T.J. and A. Hershman (1961). AICHE Journal **7** , 488.
15. Clare , H. and P.F. Aswood (1962). Instr. Practice , **16** , 70.
16. Espig , H. and R. hoyle (1965). J. Fluid Mech. , **22** , 671.
17. Kirkbride , C.G. (1934). Ind. Eng. Chدm. , **26** , 425.
18. Ducker , A. E. and O. P. Bergelin (1952). Chem. Engng. Progress , **48** , 957.
19. Tailby , S. R. and S. Portalski (1960). Trans. Inst. Chem. Engrs. , **38** , 324.
20. Hickman , K.C.D. (1944). Chemical Review , **34** , 71.
21. Newitt , D.M. , N. Dombrowski and D.E. Ward (1961). The Journal of Photographic Science , **9** , 353.