



۸۷/۱/۱۰۶۵۳۰
۱۷/۱۲/۱۹



دانشکده فنی و مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان

بررسی تجربی رفتار هیدرودینامیکی جریان فیلم و فیلم ریزان با

خواص فیزیکی متفاوت در حضور پمپ رسانش EHD

بر روی سطح تخت مایل

استاد راهنما

پروفسور اسماعیل اسماعیل زاده

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۱۵

استاد مشاور

دکتر فرامرز طلعتی

پژوهشگر

محمد جواد دانایی فر

بهمن ۸۷

۱۰۸۵۰۱

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

که هر چه دارم از دعای خیر این

عزیزان است

به نام خدا

هرگز نخورد آب، زمینی که بلند است

افتادگی آموز اگر طالب فیضی

خدای بزرگ و مهربان را به خاطر توفیق انجام این پایان نامه، شاکرم و از او می‌خواهم که بقیه زندگی‌ام را نیز در راه علم و دانش سپری نمایم. چرا که با اهل علم بودن، به بشر کرامت انسانی می‌بخشد و خروج از این راه موجب گمراهی و ندامت می‌گردد.

در اینجا جا دارد از زحمات بی دریغ استاد راهنمای عزیزم، جناب آقای پروفیسور اسماعیل زاده، تقدیر و تشکر نمایم؛ که به حق، اگر کمک‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند ایشان نبود، طی کردن این مسیر، میسر نبود.

همچنین از جناب آقای مهندس حمایت خواه، مهندس غرابی و مهندس عباسی به خاطر کمک‌ها و راهنمایی‌های ارزشمندشان، کمال تشکر و سپاسگزاری دارم.

از همه دوستان و عزیزانی که در مدت تحصیل در کنار بنده بوده و در سختی‌ها یاری‌گر اینجانب بوده‌اند، بسیار ممنون و سپاسگزارم؛ از جمله: آقایان مهندس رضا ابراهیمی، مهندس فرهاد شمس، مرتضی سهرابی و سایر عزیزانی که نام‌شان ذکر نشده است.

در پایان از همه افراد خانواده‌ام، به خصوص پدر و مادر عزیزم به خاطر تحمل سختی‌ها و حمایت‌های بی دریغ‌شان در مدت تحصیل تقدیر و تشکر می‌نمایم.

محمد جواد دانایی فر

بهمن ۱۳۸۷



فرم مربوط به چکیده پایان نامه

نام خانوادگی دانشجو: دانایی فر

نام: محمد جواد

عنوان پایان نامه: بررسی تجربی رفتار هیدرودینامیکی جریان فیلم و فیلم ریزان با خواص فیزیکی متفاوت در حضور پمپ رسانش EHD بر روی سطح تخت مایل.

استاد راهنما: پروفسور اسماعیل اسماعیل زاده

استاد مشاور: دکتر فرامرز طلعتی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: تبدیل انرژی دانشگاه: تبریز

دانشکده: فنی و مهندسی مکانیک تاریخ فارغ التحصیلی: بهمن ۱۳۸۷ تعداد صفحات: ۸۸

کلید واژه‌ها: هیدرودینامیک فیلم ریزان، الکترو هیدرودینامیک، پمپ رسانش الکتریکی، ناپایداری فصل مشترک فیلم ریزان

چکیده: در کار حاضر پدیده هیدرودینامیک فیلم ریزان بر روی سطوح تخت افقی و مایل در حضور و بدون حضور میدان الکتریکی با ولتاژ بالا مطالعه قرار می‌شود. اثر تغییر زاویه میل صفحه نسبت به افق در فرایند تکوین و تکامل رژیم‌های جریان فیلم ریزان نسبت به لزجت مایع در حالت بدون حضور میدان الکتریکی با ادبیات فن مقایسه شده است و نتایج به دست آمده برای ضخامت و سرعت متوسط فیلم ریزان مایع با نتایج مدل ساده شده Nusselt و کار تجربی Moran مقایسه و نتایج $\delta^2 = 0.316(g \cos \theta / \nu)$ و $u = 0.997 (\nu^2 / g \cos \theta)^{1/3} Re^{0.314}$ با دقت کافی به دست آمده است. اثر میدان الکتریکی با ولتاژ بالا در سکوی تست اولیه به منظور کسب نتایج پمپ رسانش الکتریکی بر روی مایعات با خواص الکتریکی متفاوت به طور تجربی جداگانه انجام گرفته است و برای مایعات دی الکتریک کاربردی در صنایع مختلف (نفت سفید، روغن ترانسفورمر، N-Hexane، مخلوط نفت سفید- روغن موتور) این پمپ با نتایج مقبولی تا سرعت بیشینه ۱۶ cm/s کارایی نشان داده است. در تست سکوی اصلی با گذاشتن آرایه ثابتی از الکترودها، تعداد شش واحد پمپ رسانش الکتریکی به منظور بررسی اثر حضوری میدان الکتریکی بر رفتار جریان فیلم ریزان بررسی شده است. با اندازه گیری رفتار موجی سطح آزاد فیلم مایع با روش پردازش تصویری اثرات حضوری میدان الکتریکی در به هم زدن پایداری فصل مشترک به نتایج جالب توجهی منتهی شده است. با اعمال این میدان، ناپایداری فصل مشترک به منظور کاربرد آن در فرایندهای پدیده انتقال (گرم و جرم) کاملاً نتیجه‌دار است.

عنوان.....	صفحه.....
مقدمه.....	۱.....

فصل اول: بررسی منابع

۱-۱ پایه‌های نظری.....	۳.....
۱-۱-۱ فیلم ریزان.....	۳.....
۱-۱-۲ الکتروهیدرودینامیک.....	۸.....
۱-۱-۳ مزایا و کاربردهای EHD و پمپ‌های EHD.....	۱۷.....
۲-۱ پیشینه پژوهش.....	۱۹.....
۱-۲-۱ پمپ القایی.....	۱۹.....
۲-۲-۱ آیون-درگ پمپ.....	۲۰.....
۳-۲-۱ پمپ رسانش الکتریکی.....	۲۲.....

فصل دوم: مواد و روش‌ها

۱-۲ بررسی هیدرودینامیکی فیلم ریزان.....	۳۰.....
۱-۱-۲ طرحواره سکوی آزمایش.....	۳۰.....
۲-۱-۲ معرفی قسمت‌های مختلف سکوی آزمایش.....	۳۳.....
۳-۱-۲ روش پردازش تصویری.....	۳۹.....
۴-۱-۲ اندازه‌گیری ضخامت.....	۴۰.....
۵-۱-۲ اندازه‌گیری سرعت.....	۴۱.....
۲-۲ بررسی تاثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال.....	۴۲.....
۱-۲-۲ سکوی آزمایشی.....	۴۲.....
۲-۲-۲ اندازه‌گیری سرعت، ولتاژ و جریان الکتریکی.....	۴۳.....
۳-۲-۲ آرایش الکترودها.....	۴۳.....

۴۴.....	۴-۲-۲ انتخاب سیال
---------	-------------------

فصل سوم: نتایج و بحث

۴۶.....	۱-۳ بررسی هیدرودینامیکی فیلم ریزان مایع تحت زوایا و سیال‌های مختلف
۴۹.....	۱-۱-۳ بررسی ضخامت
۵۸.....	۲-۱-۳ بررسی سرعت
۶۴.....	۲-۳ بررسی نحوه عملکرد پمپ رسانش الکتریکی بر روی سیال‌های مختلف
۷۳.....	۳-۳ بررسی تاثیر میدان الکتریکی بر روی جریان فیلم ریزان مایع
۸۳.....	۴-۳ نتیجه‌گیری
۸۴.....	۵-۳ ارائه پیشنهادات
۸۵.....	مراجع

فهرست اشکال و جداول

شماره شکل	موضوع	صفحه
شکل ۱-۱	جریان فیلم مایع بر روی سطح مایل در اعداد رینولدز مختلف	۴
شکل ۲-۱	جریان فیلم مایع بر روی سطح تخت در فرکانس‌های مختلف	۵
شکل ۳-۱	نیروی قطبی به وجود آمده در اثر گرادیان ضریب گذردهی الکتریکی	۹
شکل ۴-۱	حرکت جریان EHD به وسیله بارهای تحریک شده در اثر توزیع دمای غیر یکنواخت	۱۰
شکل ۵-۱	مد جذب EHD مربوط به پمپ‌های القایی	۱۱
شکل ۶-۱	طرحواره ای از ساز و کار پاشش یون	۱۳
شکل ۷-۱	بحث درباره مکانیزم پمپ رسانش الکتریکی	۱۵
شکل ۸-۱	اعمال میدان الکتریکی به جریان سیال دو فازی مایع - بخار	۱۷
شکل ۹-۱	تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی بر حسب میدان الکتریکی	۱۷
شکل ۱۰-۱	مدل ارائه کننده پدیده رسانش الکتریکی	۲۴
شکل ۱۱-۱	طرحواره‌ای از پمپ رسانش الکتریکی فنگ و سید یعقوبی	۲۴
شکل ۱۲-۱	(a) مستقل بودن فشار تولیدشده نسبت به تعداد جفت الکترودها در شکل بندی	۲۶
شکل ۱۳-۱	شش جفت الکترودها یکباربرده شده در منطقه کاری	۲۷
شکل ۱-۲	طرحواره سکوی آزمایش	۳۰
شکل ۲-۲	طرحواره سکو و تجهیزات به کار گرفته شده در آن	۳۲
شکل ۳-۲	پمپ	۳۴
شکل ۴-۲	مخزن بالادست	۳۵
شکل ۵-۲	شاسی سکو	۳۶
شکل ۶-۲	مخزن آرامش	۳۷
شکل ۷-۲	منطقه کاری	۳۸
شکل ۸-۲	روش اندازه گیری ضخامت	۴۰
شکل ۹-۲	سکوی آزمایشی	۴۲
شکل ۱۰-۲	طریقه نصب الکترودها بر روی صفحه	۴۳

صفحه	موضوع	شماره شکل
۴۸	رژیم لایه‌ای و موج دار بطور همزمان در $Re = 87$	شکل ۱-۳
۴۸	رژیم لایه‌ای و موج دار بطور همزمان در $Re = 210$	شکل ۲-۳
۴۸	رژیم لایه‌ای و موج دار و آشفته بطور همزمان در $Re = 1140$	شکل ۳-۳
۵۱	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 1cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۴-۳
۵۱	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 1cSt, \theta = 3.358^\circ$)	شکل ۵-۳
۵۱	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 1cSt, \theta = 4.877^\circ$)	شکل ۶-۳
۵۲	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 2.2cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۷-۳
۵۲	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 2.2cSt, \theta = 3.358^\circ$)	شکل ۸-۳
۵۲	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 2.2cSt, \theta = 4.877^\circ$)	شکل ۹-۳
۵۳	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 4.17cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۱۰-۳
۵۳	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 4.17cSt, \theta = 3.358^\circ$)	شکل ۱۱-۳
۵۳	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 4.17cSt, \theta = 4.877^\circ$)	شکل ۱۲-۳
۵۴	ضخامت بر حسب رینولدز ($\nu = 4.17cSt, \theta = 10^\circ$)	شکل ۱۳-۳
۵۵	ضخامت بر حسب رینولدز در زاوایای مختلف ($\nu = 1cSt$)	شکل ۱۴-۳
۵۵	ضخامت بر حسب رینولدز در زاوایای مختلف ($\nu = 2.2cSt$)	شکل ۱۵-۳
۵۵	ضخامت بر حسب رینولدز در زاوایای مختلف ($\nu = 4.17cSt$)	شکل ۱۶-۳
۵۶	ضخامت بر حسب زمان ($\nu = 2.2cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۱۷-۳
۵۶	ضخامت بر حسب زمان ($\nu = 2.2cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۱۸-۳
۵۶	ضخامت بر حسب زمان ($\nu = 2.2cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۱۹-۳
۵۷	ضخامت بر حسب زمان ($\nu = 4.17cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۲۰-۳
۵۷	ضخامت بر حسب زمان ($\nu = 4.17cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۲۱-۳
۵۷	ضخامت بر حسب زمان ($\nu = 4.17cSt, \theta = 1.833^\circ$)	شکل ۲۲-۳

شماره شکل	موضوع	صفحه
شکل ۳-۲۳	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 1cSt, \theta = 1.833^\circ$)	۵۹
شکل ۳-۲۴	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 1cSt, \theta = 3.358^\circ$)	۵۹
شکل ۳-۲۵	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 1cSt, \theta = 4.877^\circ$)	۵۹
شکل ۳-۲۶	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 2.2cSt, \theta = 1.833^\circ$)	۶۰
شکل ۳-۲۷	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 2.2cSt, \theta = 3.358^\circ$)	۶۰
شکل ۳-۲۸	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 2.2cSt, \theta = 4.877^\circ$)	۶۰
شکل ۳-۲۹	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 4.17cSt, \theta = 1.833^\circ$)	۶۱
شکل ۳-۳۰	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 4.17cSt, \theta = 3.358^\circ$)	۶۱
شکل ۳-۳۱	سرعت بر حسب ضخامت ($v = 4.17cSt, \theta = 4.877^\circ$)	۶۱
شکل ۳-۳۲	منحنی سرعت بر حسب ضخامت ($v = 4.17cSt, \theta = 10^\circ$)	۶۲
شکل ۳-۳۳	ضخامت بر حسب رینولدز در زاویای مختلف ($v = 1cSt$)	۶۳
شکل ۳-۳۴	ضخامت بر حسب رینولدز در زاویای مختلف ($v = 1cSt$)	۶۳
شکل ۳-۳۵	ضخامت بر حسب رینولدز در زاویای مختلف ($v = 4.17cSt$)	۶۳
شکل ۳-۳۶	سرعت بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (نفت سفید)	۶۶
شکل ۳-۳۷	سرعت بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (ان‌هگزان)	۶۶
شکل ۳-۳۸	سرعت بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (روغن ترانسفور)	۶۷
شکل ۳-۳۹	سرعت بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (مخلوط نفت سفید.....)	۶۷
شکل ۳-۴۰	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (نفت سفید)	۶۸
شکل ۳-۴۱	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (ان‌هگزان)	۶۸
شکل ۳-۴۲	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (روغن ترانسفور)	۶۹
شکل ۳-۴۳	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (مخلوط نفت سفید.....)	۶۹
شکل ۳-۴۴	سرعت بر حسب ولتاژ برای سیالات مختلف ($\delta = 2 \text{ mm}$)	۷۰
شکل ۳-۴۵	سرعت بر حسب ولتاژ برای سیالات مختلف ($\delta = 4 \text{ mm}$)	۷۰

شماره شکل	موضوع	صفحه
شکل ۳-۴۶	سرعت بر حسب ولتاژ برای سیالات مختلف ($\delta = 6 \text{ mm}$)	۷۲
شکل ۳-۴۷	سرعت بر حسب ولتاژ برای سیالات مختلف ($\delta = 8 \text{ mm}$)	۷۲
شکل ۳-۴۸	درصد افزایش سرعت بر حسب ولتاژ (کروزین و $\theta = 1.833^\circ$)	۷۵
شکل ۳-۴۹	درصد افزایش سرعت بر حسب ولتاژ (کروزین و $\theta = 3.358^\circ$)	۷۵
شکل ۳-۵۰	درصد افزایش سرعت بر حسب ولتاژ (کروزین و $\theta = 4.877^\circ$)	۷۶
شکل ۳-۵۱	درصد افزایش سرعت بر حسب ولتاژ (مخلوط نفت سفید..... $\theta = 1.833^\circ$)	۷۶
شکل ۳-۵۲	درصد افزایش سرعت بر حسب ولتاژ (مخلوط نفت سفید..... $\theta = 3.358^\circ$)	۷۷
شکل ۳-۵۳	درصد افزایش سرعت بر حسب ولتاژ (مخلوط نفت $\theta = 4.877^\circ$)	۷۷
شکل ۳-۵۴	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (نفت سفید و $\theta = 1.833^\circ$)	۷۸
شکل ۳-۵۵	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (نفت سفید و $\theta = 3.358^\circ$)	۷۸
شکل ۳-۵۶	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف (نفت سفید و $\theta = 4.877^\circ$)	۷۹
شکل ۳-۵۷	جریان بر حسب ولتاژ (مخلوط نفت سفید... $\theta = 1.833^\circ$)	۷۹
شکل ۳-۵۸	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های ... (مخلوط نفت سفید... $\theta = 3.358^\circ$)	۸۰
شکل ۳-۵۹	جریان بر حسب ولتاژ برای ضخامت‌های (مخلوط نفت سفید .. $\theta = 4.877^\circ$)	۸۰
شکل ۳-۶۰	ضخامت بر حسب زمان (نفت سفید و $\theta = 1.833^\circ$)	۸۱
شکل ۳-۶۱	ضخامت بر حسب زمان (مخلوط نفت سفید $\theta = 1.833^\circ$)	۸۲
شماره جدول	موضوع	صفحه
جدول ۲-۱	سیال‌های انتخاب شده و خواص آنها	۴۴

فهرست نمادها

کمیت‌های ابعادی

V	ولت
F	فاراد
A	آمپر
S	رسانایی الکتریکی
m	متر
s	ثانیه
kg	جرم
N	نیرو

نمادها

$E[V/m]$	میدان الکتریکی
$I[A]$	جریان الکتریکی
$Q[m^3/s]$	دبی حجمی
Re	عدد رینولدز
$W[m]$	عرض کانال
$g[m/s^2]$	شتاب جاذبه
$u[m/s]$	سرعت جریان
x	راستای طولی جریان سیال
y	راستای عمود بر جریان سیال

نمادهای یونانی

$\delta[m]$	ضخامت فیلم سیال
$\epsilon_0 [F/m]$	گذردهی الکتریکی در خلاء
$\epsilon [F/m]$	گذردهی الکتریکی

فهرست نمادها

θ	زاویه تمایل سطح نسبت به عمود
κ	ثابت دی الکتریک
$\alpha [kg / m.s]$	لزجت دینامیکی
$\nu [m^2 / s]$	لزجت سینماتیکی
$\rho [kg / m^3]$	چگالی
$\sigma [S / m]$	رسانش الکتریکی
$\tau [N / m^2]$	تنش برشی

فهرست اندیس‌ها

ave	متوسط
e	الکتریکی
max	بیشینه
w	دیوار

مقدمه

حرکت فیلم ریزان بر روی سطوح در فرایندهای شیمیایی، گرمایی و رطوبت‌گیری و خالص سازی گازها کاربرد زیادی دارد. مطالعات تجربی و تحلیلی زیادی در بحث چگالش و جوشش سیال-های تک مولفه‌ای در مراکز تحقیقاتی و آکادمیکی انجام گرفته است. الگوهای جریان فیلم ریزان مایع همانند بررسی جریان‌های خارجی بر روی سطوح از رژیم‌های متفاوت پیوسته تشکیل می‌شود. در الگوی پیوسته از رژیم لایه‌ای صاف، رژیم لایه‌ای موجی تا رژیم آشفتنه مشاهده شده است.

در کار حاضر پس از مطالعه ادبیات فن برای پدیده‌های هیدرودینامیک فیلم ریزان روی سطوح تخت، اثر تغییرات لزجت در تکوین و تکامل رژیم‌های موجود در الگوهای جریان بررسی خواهد شد. سپس با به دست آوردن نتایج رضایت بخش در این قسمت، در مرحله دوم اثرات میدان الکتریکی با ولتاژ بالا را در نحوه توزیع رژیم‌های جریان بر روی سطوح مایل در الگوهای کلی به صورت تجربی مشخص خواهد شد.

در ارتباط با کاربرد الکتروهیدرودینامیک^۱ (EHD) در کار حاضر، از روش الکترودهای چسبیده بر روی سطح تخت و در جهت عرضی صفحه تخت استفاده خواهد شد و به طور موضعی اثر این نوع آرایه که با ایجاد میدان الکتریکی تحریک یونی بین الکترودها را سبب می‌شود و به صورت پمپاژ موضعی در فرایند انتقال فیلم موثر خواهد بود، بررسی می‌شود که این مکانیزم تحت نام پمپ رسانش الکتریکی^۲ کاربرد دارد. با اعمال این روش جریان فیلم تحریک و اثرات آن بر روی جریان فیلم ریزان مایع بررسی خواهد شد.

^۱. Electrohydrodynamic

^۲. Conduction Pump

فصل اول

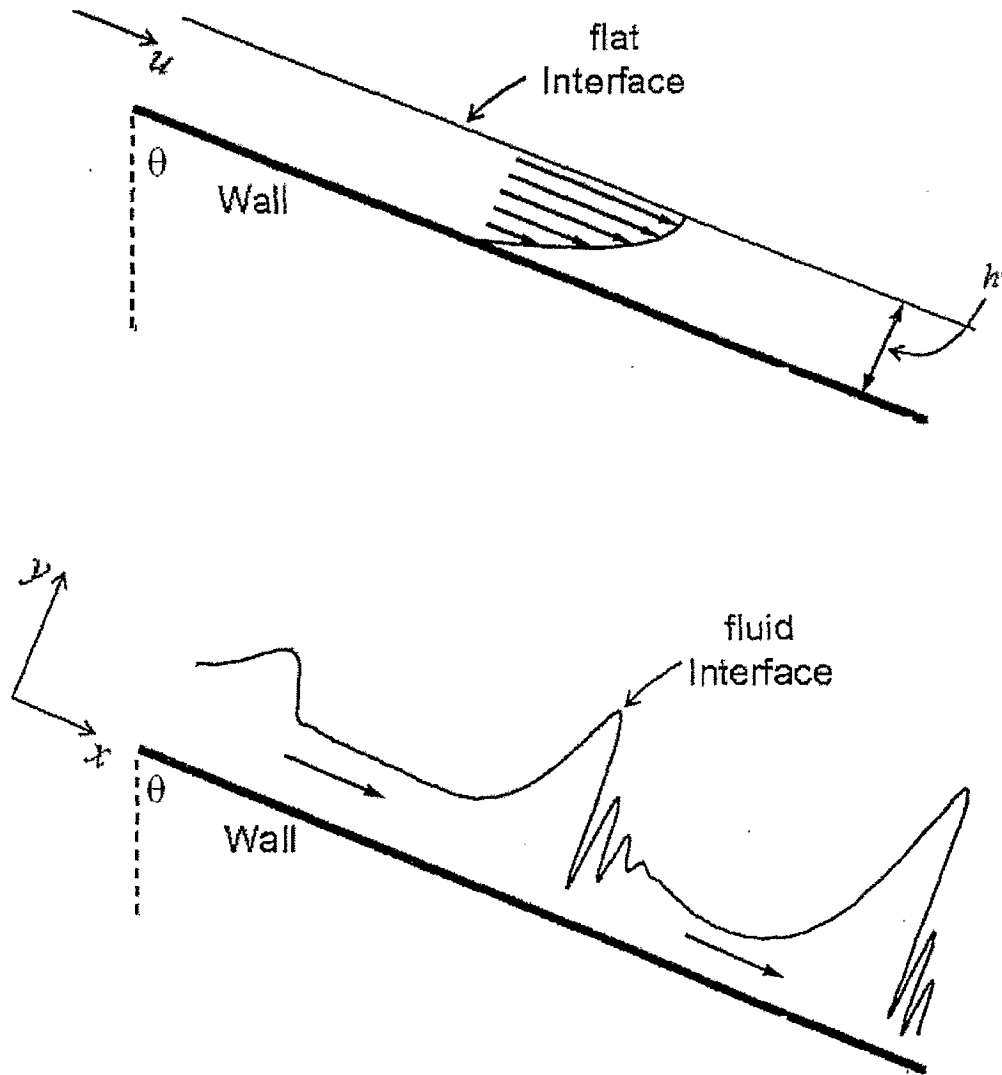
بررسی منابع

۱-۱ پایه‌های نظری

۱-۱-۱ فیلم ریزان

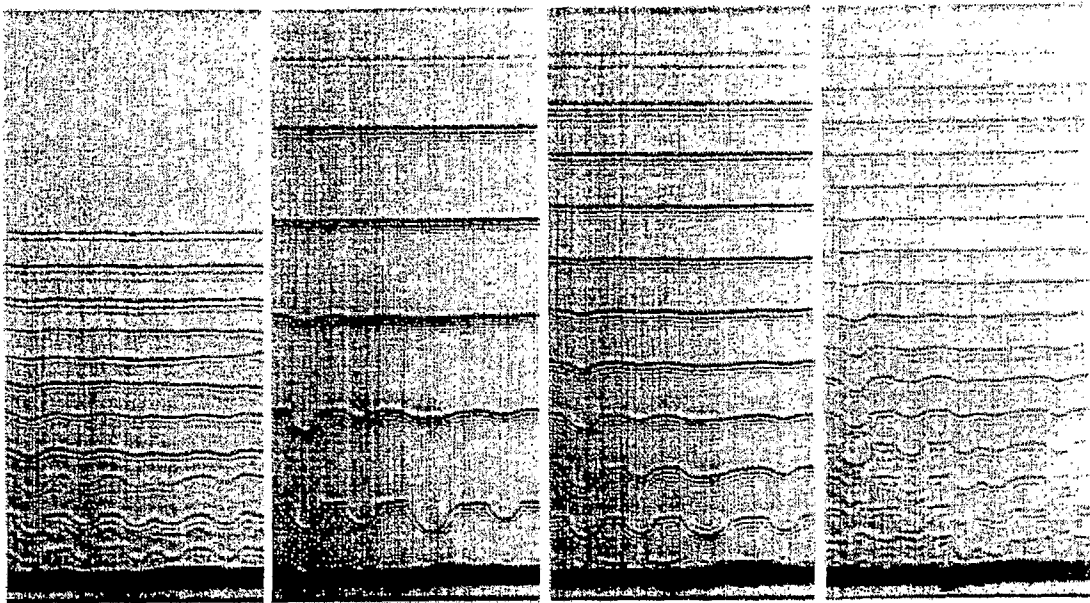
جریان‌های فیلم ریزان مایع بر روی سطوح مایل و عمودی تحت اثر نیروی جاذبه برای کاربرد-های مختلف صنعتی دارای اهمیت می‌باشند، این کاربردها شامل چگالندها، تبخیرکننده‌ها، دیوارهای متخلخل و راکتورهای شیمیایی می‌باشند. به منظور طراحی این تجهیزات صنعتی باید آهنگ‌های انتقال جرم و انتقال گرما با دقت پیش‌بینی شوند. به هرحال ویژگی‌های انتقال گرما، انتقال جرم، انتقال مومنتوم در فیلم ریزان باید به طور کامل تشخیص داده شوند به طوری که ضخامت فیلم، توزیع سرعت و تنش برشی دیواره بدرستی مدل و پیشگویی شوند.

فیلم‌های ریزان مایع از طریق سه رژیم پی در پی توصیف می‌شوند که بر اساس عدد رینولدز جریان Re ، این رژیم‌ها تفکیک می‌شوند. رژیم آرام صاف به طور معمول تا عدد رینولدز ۲۵ شکل می‌گیرد که در آن ضخامت فیلم هموار و سطح آن صاف می‌باشد. رژیم میانی که به صورت جریان آرام همراه با سطوح ریب مانند بر روی آنها می‌باشد در اعداد رینولدز بین ۲۵ تا ۱۰۰۰ اتفاق می‌افتد. ویژگی این رژیم سطوح موجی شکل همراه با نوسانات در ضخامت فیلم می‌باشد. در گذشته اینگونه اشاره می‌شد که این رژیم در گستره اعداد رینولدز ۴ تا ۲۰۰۰ رخ می‌دهد. رژیم بعدی، رژیم آشفته می‌باشد که در اعداد رینولدز بالای ۱۰۰۰ رخ می‌دهد [۱۱]. مطالعات زیادی در مورد فیلم‌های ریزان و ناحیه گذر که بین جریان‌های آرام و آشفته اتفاق می‌افتد، انجام شده است و مشاهدات نشان می‌دهد که در اعداد رینولدز بین ۳۷۰ و ۱۷۰۰ این ناحیه به وجود می‌آید [۱۲].



شکل ۱-۱ جریان فیلم مایع بر روی سطح مایل در اعداد رینولدز مختلف

مطالعه تجربی ویژگی‌های هیدرودینامیکی فیلم‌های ریزان مایع به دلیل طبیعت نازک این جریان‌ها و ناپایداری فصل مشترک آن با محیط که در ابعاد میلیمتری مشاهده می‌شوند، با امکانات آن زمان با دقت همراه نبوده است. بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری برای مطالعه میدان‌های جریان فیلم ریزان بکار برده شده است، مانند روش سرعت سنج سیم داغ (Hot Wire Anemometry)، روش‌های سینماتیکی تعقیب حرکت ذرات یا حباب‌های داخل سیال، حساسه‌های هدایت الکتریکی و روش‌های مربوط به جستجو در خواص الکتروشیمی برای تعیین کردن خواص فیلم‌های ریزان از جمله ضخامت فیلم و پروفیل‌های سرعت و رفتارهای جریان در فصل مشترک فیلم استفاده شده‌اند [۱۱].



شکل ۱-۲ جریان فیلم مایع بر روی سطح تخت در فرکانس‌های مختلف [۳]

مطالعه در مورد فیلم‌های ریزان مایع در ابتدا به وسیله نوسلت^۳ [۴] انجام شده بود. ایشان چندین فرضیه از جمله جریان پایدار و ناحیه دارای سطح تخت و جریان با خطوط مستقیم همانطور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌کنید، در نظر گرفت و سپس با در نظر گرفتن جزء دیفرانسیلی به عنوان حجم کنترل و برابر قرار دادن نیروها و شارهای ورودی و خروجی معادلات دیفرانسیلی این

³. Nusselt

نوع جریان را استخراج کرد. نتیجه معادله دیفرانسیلی، بدست آوردن گرادیان سرعت از شار مومنتوم است و همچنین با انتگرال‌گیری از گرادیان سرعت به دست آمده پروفیل سرعت سیال را بدست آورد. شرایط مرزی استفاده شده به منظور حل معادلات فیلم‌های ریزان مایع عبارتند از:

$$1- \text{سرعت سیال در دیواره صفر در نظر گرفته شده است.}$$

۲- شار مومنتوم، تنش برشی و گرادیان سرعت در سطح تداخل مایع/گاز برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

جزئیات تحلیل این نوع جریان به وسیله بیرد^۴ و همکارانش [۲] ارائه شده است.

با انجام مراحل اشاره شده در بالا، برای فیلم‌های ریزان مایع بر روی کانال مستطیلی مایل، معادلات پروفیل سرعت $u(y)$ ، تنش برشی دیوار (τ_w) ، و ضخامت فیلم (δ) به صورت زیر بدست آورده می‌شوند [۱]:

$$u(y) = \frac{\rho g \delta^2 \cos \theta}{2\alpha} \left[1 - (y/\delta)^2 \right] \quad (1-1)$$

$$\tau_w = \rho g \delta \cos \theta \quad (2-1)$$

$$\delta = \left[\frac{3\alpha u_{ave}}{\rho g \cos \theta} \right]^{(1/2)} \quad (3-1)$$

در اینجا g شتاب جاذبه، ρ چگالی مایع، α لزجت مایع و θ زاویه صفحه نسبت به خط عمود می‌باشد. اگر در معادله (۳-۱) توان با مقدار (۱/۳) جایگزین شود، برای محاسبه ضخامت فیلم از متغیرهایی که به صورت تجربی توسط نوسلت [۴] به دست آمده است، سرعت متوسط u_{ave} ، در معادله (۳-۱) ممکن است با آهنگ جریان حجمی بر واحد عرض کانال جایگزین شود. به هر حال لازم است سرعت متوسط و سرعت پیشینه با تحلیل بر روی معادلات حاکم بر جریان فیلم ریزان

⁴. Bird

بدست آورده شوند. سرعت متوسط با انتگرال گیری از معادله (۱-۱) با توجه به عرض کانال و ضخامت فیلم و تقسیم بر سطح مقطع جریان فیلم بدست می‌آید. سرعت ماکزیمم نیز با قرار دادن $y = 0$ (سطح تداخل مایع/گاز) در معادله (۱-۱) بدست می‌آید.

$$u_{ave} = \frac{\rho g \delta^2 \cos \theta}{3 \alpha} \quad (۴-۱)$$

$$u_{max} = \frac{\rho g \delta^2 \cos \theta}{2 \alpha} \quad (۵-۱)$$

از معادله (۱-۱) واضح است که پروفیل سرعت سهموی شکل می‌باشد.

به علت تغییرات رژیم جریان در نواحی صاف سطح، روش نوسلت فقط در ابتدای صفحه که فصل مشترک تقریباً رفتار پایا و بدون امواج است، تا حدودی نزدیک به واقعیت است. در بقیه نواحی چنین تصویری با واقعیت فیزیکی همراه نبوده است. بنابراین اغلب مطالعات در دهه‌های گذشته به روش‌های تجربی معطوف بوده است. ناکاریاکوف و همکارانش [۳] با استفاده از تصویر برداری از ذرات ریز در مخلوط آب و گلیسرین سرعت و ضخامت فیلم ریزان مایع را اندازه گیری کردند. اسماعیل‌زاده و همکارانش [۵] جریان فیلم مایع را در داخل کانال افقی با اندازه‌گیری ضخامت فیلم، تنش‌های برشی و رفتار امواج فصل مشترک بصورت تجربی بررسی نمودند. موران^۵ و همکارانش [۱] به بررسی تجربی متغیرهای هیدرودینامیک جریان فیلم ریزان لایه‌ای بر روی سطح تخت مایل تحت زاویه ۴۵ درجه و در رنج اعداد رینولدز ۱۱ تا ۲۲۰ به وسیله سیال کاری روغن سیلیکون که لزجت آن ۲۰cSt است، با استفاده از روش PDA پرداختند. آنها در کارشان روابطی را برای ضخامت بر حسب رینولدز و سرعت بر حسب ضخامت در جریان فیلم ریزان ارائه دادند. البته کارهای عددی و تحلیلی مناسبی نیز در این زمینه صورت گرفته است که با وارد نمودن معادلات کمکی توانسته‌اند اثرات امواج را نیز مدل نمایند [۷و۶].

⁵. Moran