

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ХАДИ - АБЕИД АЛЬ - БАШЕР

УДК 66.048.66.067

ТЕЧЕНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ВДОЛЬ
ГОФРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

05.07.01 - Аэродинамика и процессы тепло-
обмена летательных аппаратов

05.23.16 - Гидравлика и инженерная гидро-
логия

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1993

АВ 28.259

Работа выполнена в Киевском политехническом институте

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Яхно О.М.

Официальные оппоненты: доктор физико-математи-
ческих наук,
профессор Шмаков Ю.И.
кандидат технических наук
Шквар Е.А.

Ведущая организация указана в решении специализиро-
ванного совета.

Защита состоится "10" ноября 1993 года в 14³⁰ часов
на заседании специализированного совета К 072.04.02 в
Киевском институте инженеров гражданской авиации.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения,
просим направлять по адресу: 252058, Киев-58, проспект
Комарова, 1, ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке инсти-
тута.

Автореферат разослан "6" октябре 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент

А.Г.Басякєвєкє

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00810645 (0)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших задач в области интенсификации и развития массообменных процессов, углубление знаний в области диссипации энергии потоков вязких и аномально-вязких жидкостей, а также расширения знаний о природе гидравлических сопротивлений является разработка основ расчета гидродинамических параметров потоков, движущихся в зоне гофрированных поверхностей. Подобного рода поверхности и течения вблизи их вызывает интерес во многих областях промышленности - в авиации, машиностроении, нефтяной, газовой промышленности, в системах автоматики, управления и т.п.

В работе на основании экспериментальных данных, анализа течения вблизи гофрированных поверхностей, гофры которых расположены перпендикулярно к направлению потока, получены данные о распределении скоростей, давлений, определены касательные напряжения и предложены формулы для расчета коэффициента гидравлического трения. Эти параметры учитывают также реологические свойства жидкостей, протекающих вблизи таких поверхностей, и их аномальные особенности.

Целью диссертационной работы является:

- расширение представлений о диссипативных процессах, происходящих в потоках неньютоновских жидкостей, движущихся вблизи гофрированных поверхностей с различными типами-размерами;
- получение новых зависимостей для расчета кинематических и динамических характеристик потока в каналах, имеющих стенки, выполненные в виде гофрированных поверхностей;
- получение методики расчета гидравлических сопротивлений для рассматриваемых случаев течения, которые бы учитывали как реологические свойства движущихся жидкостей так и геометрические особенности поверхностей каналов.

Метод исследований. Исследования базируются на экспериментальных данных и теоретическом анализе, существующих данных и проведенных в работе опытов по изучению гидродинамических характеристик потока в каналах со сложной формой поверхности его стенок.

Объектом исследования являются физические и математические

модели, описывающие поведение аномально-вязких жидкостей вблизи гофрированных поверхностей.

Научная новизна.

1. Разработаны физическая и математическая модели, описывающие кинематические и динамические характеристики потока аномально-вязкой жидкости подчиняющиеся степенному реологическому закону Оствальда Де Вилиа вблизи гофрированных поверхностей, описываемые конусоидальным законом с различными размерами высоты гофр и расстояние между ними.

2. Получены зависимости, описывающие эпюру скоростей вблизи гофрированных поверхностей и ее изменение в зависимости от формы и размеров гофр.

3. Предложены новые формулы для расчета гидравлических потерь энергии и коэффициента гидравлического трения как функции реологических констант закона Оствальда Де Вилиа и геометрических особенностей гофрированных поверхностей.

Практическая ценность заключается в возможности применения результатов исследований для совершенствования дроссельной арматуры в гидравлических системах; интенсификации тепло-массообменных процессов в химической, газовой и нефтяной промышленности, в авиационных системах и конструкциях. Предложенные формулы и аналитические зависимости позволяют с достаточно высокой степенью точности производить расчет гидравлических сопротивлений в различных системах, где встречаются гофрированные поверхности.

Реализация работы. Результаты работы используются в Киевском политехническом институте на кафедре ГПАГ и в научной исследовательской лаборатории НИЛ АПП. Планируется их применение на предприятиях Ирака.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на республиканской конференции по гидравлическим системам и гидроприводам (г.Севастополь, 1991), на республиканском семинаре по гидравлике (г.Киев, КАДИ, 1993 г.), а также на заседании кафедры гидравлики и гидропневмоавтоматики КПИ, 1993 г.

Публикация. Основное содержание диссертационной работы

опубликовано в двух научных статьях.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 15 таблиц, библиографический список содержит 60 наименований различных работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во многих областях промышленности: в авиации, в химическом машиностроении, в нефтяной и газовой промышленности, в различного рода гидравлических системах приходится встречаться с течением аномально-вязких жидкостей вблизи поверхностей, имеющих крупную упорядоченную шероховатость или гофры.

Исследованиями в области связанной с шероховатостью занимался ряд ученых таких как Альтшуль А.Д., Гинзбург И.П., Исаченко В.П., Миллионщиков М.Д., Кобзарь Л.Л., Ралф, Уолш М.Д. и многие другие. Результатами этих исследований являются зависимости для расчета коэффициента гидравлического трения при течении невязких потоков жидкости в трубах и каналах; кроме того были сделаны попытки объяснения физических процессов, происходящих в жидкости вблизи этих поверхностей.

В работах Миллионщикова и Кобзаря представлены также теоретические основы для расчета и описания влияния формы поверхности на вихреобразование, коэффициент гидравлического трения и распределение скоростей. Вместе с тем почти полностью отсутствуют (за небольшим исключением) исследования, посвященные течению невязких жидкостей вблизи гофрированных поверхностей. В тоже время такие исследования являются актуальными для ряда машин и аппаратов. С ними приходится встречаться например в теплообменном оборудовании, пленочных выпарных аппаратах, различного рода дроссельных элементах систем гидроавтоматики, на гидротранспорте, в авиационной технике и в других областях.

Существуют данные, которые указывают на то, что влияние гофрированной поверхности на гидравлическое сопротивление потока может быть различным: при течении жидкости вдоль гофр гидравлическое сопротивление уменьшается; а при течении поперек гофр.

увеличивается. К сожалению эти данные носят лишь качественный характер. В связи с тем, что на практике как показал анализ довольно часто приходится иметь дело с течениями второго типа они вызывают больший интерес.

Приведенный в работе краткий обзор состояния дел по данному вопросу подтвердил актуальность темы исследований. Особенно для неньютоновских жидкостей таких типов как растворы и расплавы полимеров, различного рода нефтепродукты, смазки, эмульсии и т.п.

В своем большинстве данные жидкости по реологическим свойствам близкие к жидкостям подчиняющимся закону Оствальда Де Вилля.

В план исследования входит изучение ламинарного и турбулентного изотермического течения данного типа жидкостей вдоль рассматриваемых поверхностей; определение гидравлических сопротивлений и влияние на них как реологических свойств жидкости, так и форм и размеров гофр. Предполагается также установить, каким образом профиль поверхности может оказывать влияние на распределение скоростей в канале, на появление и формирование вихреобразования.

Решение данной задачи предполагалось осуществить на двух примерах. Первый, как наиболее простой, связан с безнапорным течением, стекающим под действием гравитации жидкости, т.е. пленочным течением. Второй, течение напорное в канале, имеющем гофрированную стенку.

Обобщенные результаты исследования по данным двум случаям позволяют сделать выводы о влиянии гофрированных поверхностей на гидродинамические параметры потока неньютоновских жидкостей, что и является основной целью работы и позволит применить полученные данные к расчету конкретного типа оборудования, рабочей частью которого являются рассматриваемые каналы.

В диссертации в качестве первого примера влияние гофрированных поверхностей на течение жидкости (глава 2) рассмотрены гравитационные течения вдоль вертикальной гофрированной поверхности. На основании исследований проведенных Воронцовым Е.Г., Яхно О.М. показано каким образом деформируются благодаря наличию гофр эпюра скоростей в потоке вблизи стенки, как влияют гофры на величину касательных напряжений, а следовательно и

коэффициента гидравлического трения.

Приведены аналитические зависимости для "приращения" величины касательных напряжений и показано от каких параметров зависят такие "приращения". Исследования проводились для гофрированных поверхностей, форма которых описывается уравнением

$$f(x) = \frac{h}{2} \left(\cos \frac{2\pi}{e} x + 1 \right)$$

где h - высота гофр, e - длина волны (расстояние между гофрами).

Показано, что теоретическое решение уравнения движения, описывающее подобное течение удобно записывать в криволинейной системе координат связаны с формой поверхности гофр.

Для подтверждения и количественной оценки проведенных во второй главе качественных выводов, в третьей главе диссертации описано физическое моделирование рассматриваемой задачи. С этой целью был спроектирован и создан экспериментальный стенд на котором можно было проводить визуализацию потока неньютоновской жидкости вблизи гофрированных поверхностей, а также измерять локальные скорости и давления в различных точках и сечениях. Измерение давления осуществлялось датчиками давления, а измерение скорости осуществлялось методом меченых частиц разработанным и описанным в работах Пищенко И.А.

Суть данного метода заключается в введении в поток электропроводных частиц жидкости, положение которых фиксируется в процессе их продвижения по каналу. Рабочий участок экспериментального стенда представляет собой канал прямоугольного сечения выполненный из оргстекла, что дает возможность осуществлять визуализацию потока. На рабочем участке имелась возможность установки и замены гофрированных поверхностей с высотой гофр 1, 3, 5 мм. Установка была оснащена расходомером, устройством типа РКЭ-2.

В качестве рабочих жидкостей использовались вода, водный раствор ПВС и натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы КМЦ-Н, изготовленных на Каменском химкомбинате "Россия" (ТУ 6-15-1077-77). При проведении опытов использовались растворы различных концентраций в диапазоне от 0,5 до 3,5%. Геологические свойства растворов определялись на основании измерений проведенных на ротацион-

ном вискозиметре Реотест-2. В результате этих экспериментов установлено, что рабочие жидкости (растворы КМЦ-Н и ПВС) являются неньютоновскими подчиняющимися степенному закону Оствальда Де Вилля жидкостями. На рис.1 представлены в качестве примера реологические кривые для водного раствора КМЦ-Н.

В результате проведенных экспериментов получены эпюры скоростей для неньютоновского потока вблизи гофрированных поверхностей рис.2, кривые распределения давления по длине канала с гофрированной поверхностью стенки, зависимость перепада давления от расхода жидкости и ее реологических свойств рис.3. Данные результата эксперимента, погрешность которых не превышала 5-7%, послужили основой для анализа влияния формы и размеров гофр на кинематические и динамические характеристики потока. При этом разработана идеализированная модель течения жидкости в канале, где одна из стенок выполнена гофрированной. На основании этой модели, решая соответствующее уравнение движения было показано, что влияние гофр сказывается не только на потерях энергии, но и на деформации эпюры скоростей, что полностью подтверждает эксперимент. Наличие гофр приводит к смещению положения максимальной скорости в потоке в сторону гладкой поверхности. Величина такого смещения может быть определена из зависимости аналогичной толщине вытеснения для пограничного слоя. Для рассматриваемого случая значения средней и максимальной скоростей могут быть определены из выражений:

$$\left. \begin{aligned} U_{ср} &= \frac{Rr}{2} \left(\frac{n}{a+b n} \right) \left(\frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \\ U_{max} &= \frac{Rr}{2} \left[\frac{n}{a(1+n)} \right] \left(\frac{\tau_{ср}}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где a и b зависят от соотношения сторон прямоугольного сечения и для нашего канала соответственно равны $a = 0,267$, $b = 0,737$.

Что же касается продольной составляющей скорости, то, как показали наши эксперименты, она может быть определена из выражения

$$U_{x(y)} = \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left[\left(\frac{2|y|}{H} \right)^{\frac{n+1}{n}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \Delta U_{(x,y)} \quad (2)$$

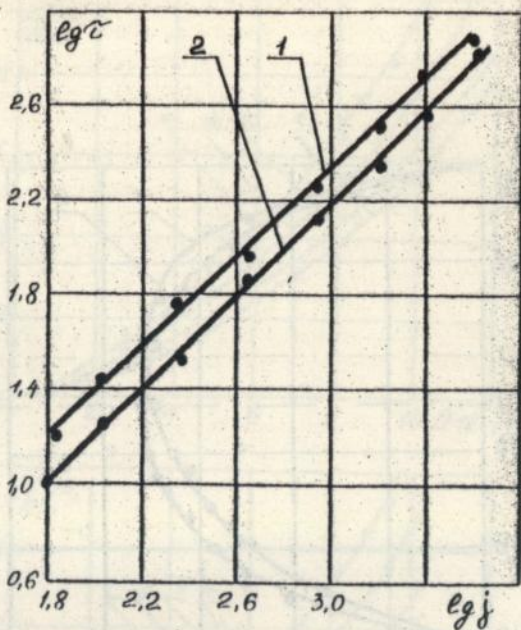


Рис.1. Зависимость $\lg c = f(\lg j)$ для водного раствора КМЦ-Н - 1 - 3,5%; 2 - 2,5%

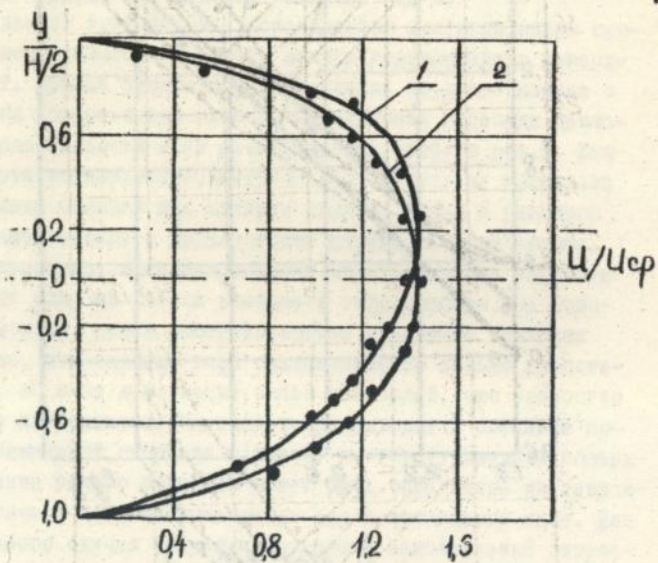


Рис.2. Эпюры скоростей для гладкой (2) и гофрированной поверхности (1) при течении водного раствора ПВС

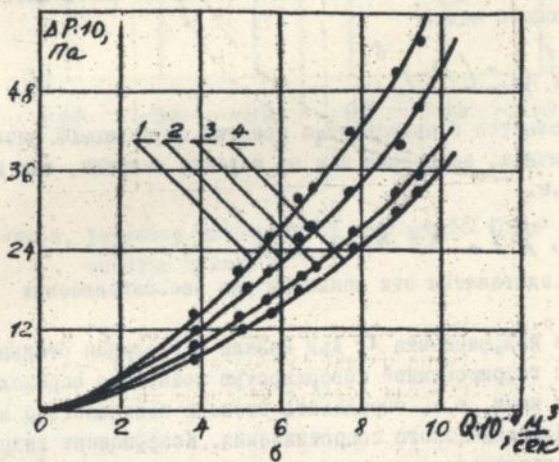
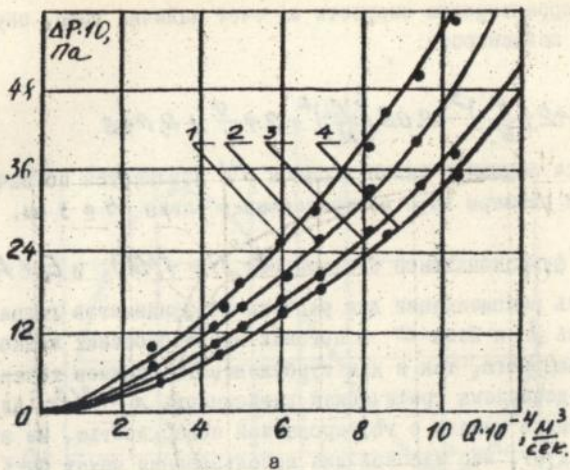


Рис. 3. Зависимость $\Delta P = f(Q)$ при течении 2,5% водного раствора КМЦ-Н (а); 3,5% КМЦ-Н (б)
 1 - высота гофр = 5 мм; 2 - высота гофр = 3 мм;
 3 - высота гофр = 1 мм; 4 - гладкая поверхность

где ΔU - корректировка скорости за счет наличия гофр, определяющаяся из зависимости:

$$\frac{\Delta U}{U_{\text{ср}}} = 0,42 \left(\frac{y}{H}\right)^3 - 0,06 \left(\frac{y}{H}\right)^2 - 0,4 \frac{y}{H} + 0,046 \quad (3)$$

На рис.4 показано каким образом ΔU изменяется по сечению канала, если размеры гофр соответственно равны $h = 3$ мм, $e = 15$ мм.

Анализ функциональной зависимости $\Delta P = f(G)$ и $E_u = f(Re)$ позволил дать рекомендации для расчета коэффициентов гидравлических потерь λ и Шези C в потоках неньютоновских жидкостей как для ламинарного, так и для турбулентного режимов течения. На рис.5 представлена графическая зависимость $\lambda = f(Re)$ для случая течения в канале с гофрированной поверхностью. Из этих графиков следует, что удобной для использования может быть формула следующего вида:

$$\frac{1}{4} \lambda = (Re)^{-a} \quad (4)$$

где Re определяется с применением понятия эффективной вязкости, a, b - величины, зависящие как от индекса течения, так и от высоты гофр т.е.

$$a = a(n, \frac{h}{H}), \quad b = b(n, \frac{h}{H}).$$

В таблице I представлены эти величины для рассматриваемых жидкостей.

Сравнение коэффициента λ для канала с гладкими стенками и для канала с гофрированной поверхностью позволило определить различие между ними, т.е. определить степень влияния гофр на коэффициент гидравлического сопротивления. Коэффициент гидравлического сопротивления для гофрированной поверхности $\lambda_{\text{гоф}}$ может быть определен как

$$\lambda_{\text{гоф}} = \lambda_{\text{г}} + \Delta \lambda$$

где $\lambda_{\text{г}}$ - коэффициент гидравлического сопротивления для канала с гладкой поверхностью.

В таблице 2 приведены значения $\Delta \lambda$ при различных значениях раз-

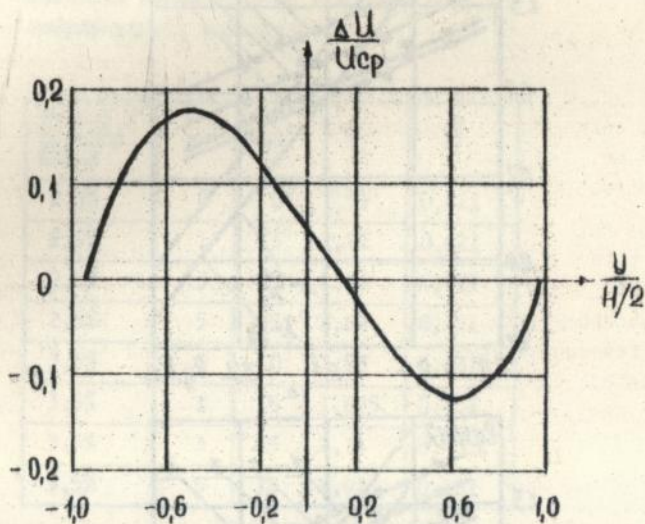


Рис. 4. Характер изменения величины (ΔU) по сечению канала

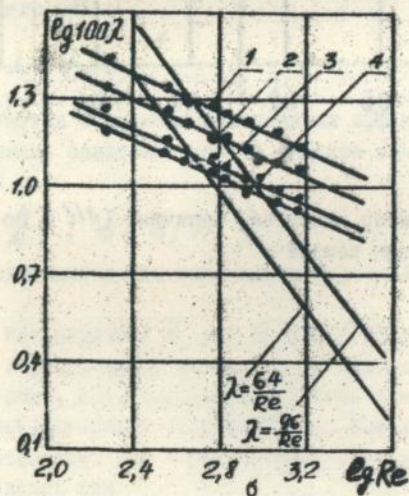
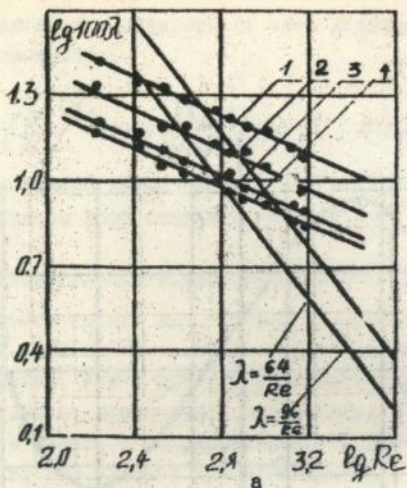


Рис. 5. Зависимость $\lambda = f(Re)$ для 2,5% водного раствора КМЦ-Н (а), 3,5% КМЦ-Н (б)
 1 - высота гофр = 5 мм; 2 - высота гофр = 3 мм;
 3 - высота гофр = 1 мм; 4 - гладкая поверхность

Таблица I

Значения параметров a и b для канала с гофрированной поверхностью

Водный раствор КМЦ-Н *	h , мм	L , мм	a	b
2,5%	0	0	1,59	0,421
2,5%	1	15	1,72	0,421
2,5%	3	15	2,16	0,421
2,5%	5	15	2,62	0,421
3,5%	0	0	1,53	0,431
3,5%	1	15	1,675	0,431
3,5%	3	15	2,14	0,431
3,5%	5	15	2,61	0,431

* - при $Re = 500-2300$

Таблица 2

Водный раствор КМЦ-Н	k , Пас	n	Размеры гофр h/H	λ_M^*	$\lambda_{гор}$	$\Delta\lambda$	λ_M	$\lambda_{гор}$	$\Delta\lambda$
				при $Re = 1500$			при $Re = 500$		
2,5%	0,027	0,9	0,034	0,047	0,079	0,032	0,062	0,125	0,063
2,5%	0,027	0,9	0,103	0,047	0,100	0,053	0,062	0,158	0,096
2,5%	0,027	0,9	0,172	0,047	0,12	0,073	0,062	0,189	0,127
3,5%	0,0505	0,8	0,034	0,044	0,071	0,027	0,059	0,114	0,055
3,5%	0,0505	0,8	0,103	0,044	0,084	0,04	0,059	0,136	0,077
3,5%	0,0505	0,8	0,172	0,044	0,109	0,065	0,059	0,177	0,118

* - коэффициент гидравлического сопротивления для канала с гладкой поверхностью по формуле Метцера.

мера гофр. Аналогично формулы для $\lambda_{гоф}$ может быть записано и выражение для напряжений, действующих у гофрированной поверхности.

Таким образом на основании физического и математического моделирования удалось получить и обобщить выражения, характеризующие коэффициент гидравлического трения и коэффициент Шези, как функции числа Рейнольдса Re , реологических свойств жидкости и размеров гофр. Пример такого обобщения представлен в диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Анализ работ, посвященных течению вязких и аномально-вязких жидкостей вдоль поверхностей, имеющих поперечное потоку расположение гофры, показал, в какой степени все еще слабо изученной является данная задача.

В то же время в машиностроении, в рабочих узлах многих машин и аппаратов все чаще и чаще встречаются каналы с гофрированными поверхностями (авиация, химическое машиностроение, аппараты холодильной промышленности, различного рода дросселирующие элементы в системах гидроавтоматики и т.п.).

К сожалению, как показал обзор, проведенный в первой главе, до настоящего времени отсутствовали надежные рекомендации по расчету интегральных параметров потока, особенно жидкости, обладающие аномальной вязкостью. Этим объясняется актуальность и целесообразность проведенных в диссертации исследований.

Эти исследования осуществлялись как теоретически, так и экспериментально. Теоретические исследования позволили дать качественную оценку влияния гофрированной поверхности на кинематические и динамические параметры потока, движущегося вблизи нее.

При проведении экспериментальных исследований был создан оригинальный стенд, позволяющий производить как визуальное наблюдение за потоком, так и измерять соответствующие параметры. Параллельное с работой на стенде измерение на вискозиметре реологических свойств жидкости дало возможное получение заключения о влиянии реологических параметров на параметры потока.

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Теоретически показано, в какой степени реологические свойства жидкости и форма гофр поверхности влияют на касательные напряжения в потоке, т.е. способствуют интенсификации диссипативных процессов, происходящих в пристенной области.

2. Создан экспериментальный стенд, дающий возможность проводить визуализацию потока в пристенной области и осуществлять измерение давлений и локальных скоростей в различных сечениях. Благодаря этому получены данные о появлении вихреобразования в области гофр даже при ламинарном режиме течения жидкостей, подчиняющихся степенному закону Оствальда Де Вилия.

3. Разработана идеализированная модель, позволяющая прогнозирование деформации эпюры скоростей в канале за счет наличия гофр. Такое прогнозирование полностью подтверждается экспериментальными данными.

4. Показано, что наличие гофр способствует повышению интенсивности диссипативных процессов, приводящих к торможению потока, а следовательно - к повышению гидравлических потерь и деформации эпюры скоростей. Деформация эпюры скоростей проявляется в том, что максимум смещается относительно геометрической оси в сторону гладкой стенки на величину, которую можно определить по формуле для расчета толщины вытеснения в пограничном слое.

5. Получены зависимости для определения коэффициента гидравлического трения λ как функции числа Рейнольдса и размеров гофр. Даны рекомендации по расчету перепада давления в каналах с гофрированными стенками. Показано, что коэффициент λ при ламинарном режиме течения может быть определен по формуле

$$\frac{1}{4} \lambda = a (Re_m)^{-b}$$

где a и b - параметры, зависящие не только от индекса течения, но и от размеров и форм гофр.

6. Материалы диссертации опубликованы в республиканских сборниках "Химическое машиностроение" и "Гидравлика и гидротехника". Апробация диссертации осуществлена на республиканском семинаре по гидравлике в марте 1993 г. и на республиканской конференции по гидропневмоавтоматике и гидроприводу в октябре 1991 г.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

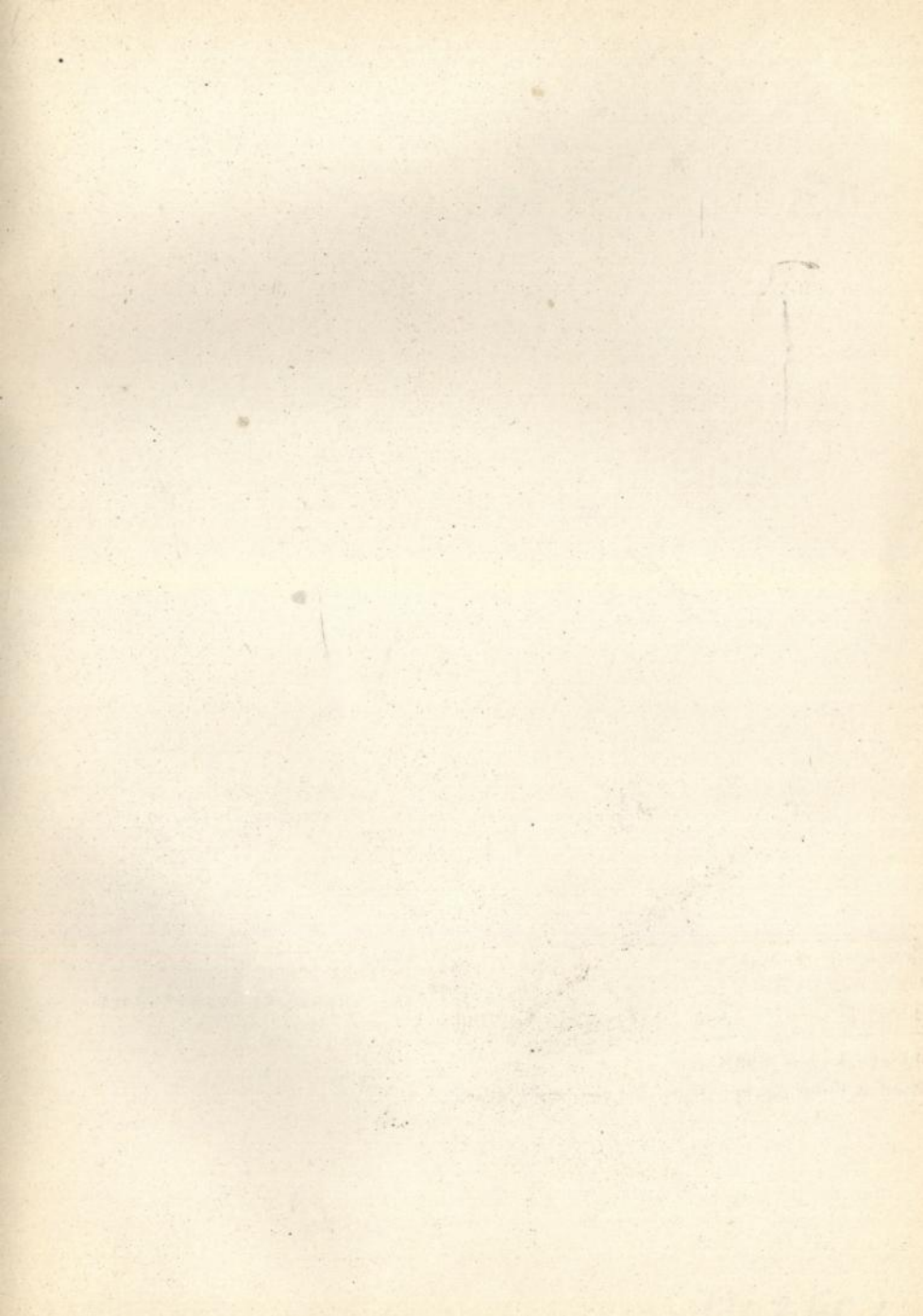
1. Кривошеев В.С., Хади А.А., Красношапка Н.Г. Расчет интегральных характеристик потока неньютоновских жидкостей в сложных гидравлических системах. (тез. докл. науч.-техн. конф. "Реология гидравлически сложных сред и гидропневмопривод в машиностроении"). К., 1991. - С. 79.

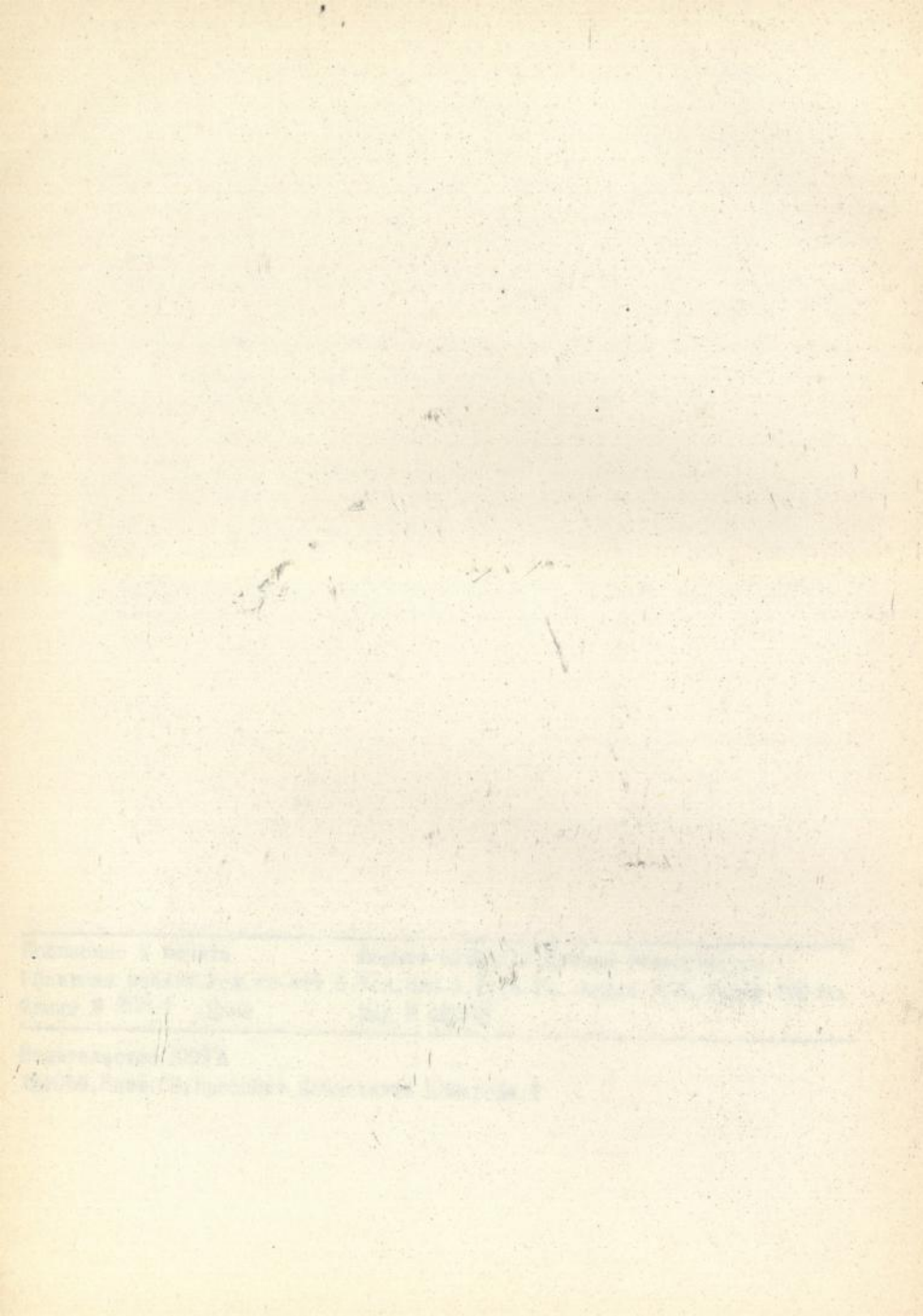
2. Анализ возможного метода расчета критерия Рейнольдса для двухслойных потоков / Яхно О.М., Желяк В.И., Хади А.А., Сивак П.В. // Хим. машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1992. Вып. 55. - С. 3-8.

3. Хади А.А. Влияние профиля стенок канала на гидравлические сопротивления потока в них // Гидравлика и гидротехника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1993. - Вып. 57. - С. 34-37.

Подписано в печать Формат 60x64/16. Бумага типографская.
Сфетная печать. Усл. кр-стт. 6. Усл. печ. л. I, 16. Уч. - изд. л. I, 25. Тираж 100 экз.
Заказ № 205-I .Цена .Изд. № 425/III

Издательство КИИГА
252058, Киев-58, проспект Космонавта Комарова, 1





463661

Ab 28.059

AB 28.259