

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ-
АКТИВНЫЕ
КОМПОЗИЦИИ
В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ
И ЭКОЛОГИИ**



Донецк 2019

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ-АКТИВНЫЕ
КОМПОЗИЦИИ В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ
И ЭКОЛОГИИ**

ПОСВЯЩАЕТСЯ
110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
ЧЛ.-КОРР. НАН УКРАИНЫ
И.Л. ПОВХА



Донецк 2019

УДК 532.517.4:532.13+678.7

ББК Ж123+Б1

С375

Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии: Монография / Симоненко А.П. [и др.] ; под общ. ред. д.т.н. А.П. Симоненко.— Донецк: ДонНУ, 2019 — 207 с.

УДК 532.517.4:532.13+678.744.7

ББК Ж123+Б1

С375

Авторы:

А.П. Симоненко – предисловие, **1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10**, приложения, общая редакция; П.В. Асланов – **2, 3, 4, 5.5.3, 5.6, 6, 7, 8.1-8.3, 8.4.2, 10**; Н.В. Быковская – 8.3.1, 8.3.2; Т.К. Гучмазова – 6.2, 6.5, 7.1-7.3, 8.1, 8.2.1, 8.2.2, 10.2; Н.А. Дмитренко – 4.2, 5.5.3, 5.6.2, 5.6.3, 6.5, 7.3, 8.1, **10**; И.А. Золотарёва – **2, 3, 4, 5.3, 5.4, 5.6.1, 5.6.2, 5.7, 7.1, 8.3.2, 8.5-8.7, 9.3.1, 9.4**; А.Ю. Собко – **3, 4, 5.5.3, 8.1, 8.2.1, 9**, приложения; С.А. Фоменко – **3, 4, 5.5.3, 5.6.2-5.6.4, 8.1, 8.2.1, 8.3.3**

Рецензенты:

Высоцкий С.П., д-р техн. наук, профессор, ГОУ ВПО «ДонНАСА»

Бирюков А.Б., д-р техн. наук, профессор, ГОУ ВПО «ДонНТУ»;

Белоусов В.В., д-р техн. наук, профессор, ГОУ ВПО «ДонНУ»

В монографии приведены основные результаты многолетних исследований, выполненных в Донецком национальном университете, по созданию и обоснованию перспектив практического использования гидродинамически-активных композиций на основе водорастворимых полимеров и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ для решения проблем энергосбережения, экологии и техногенно-экологической безопасности. Показано, что использование таких композиций за счёт снижения гидродинамического сопротивления трения позволяет повысить эффективность работы различных гидравлических систем, устройств и машин, а также решить ряд экологических проблем, связанных с тушением крупномасштабных пожаров, аварийным откачиванием воды, полимерной локализацией токсикантов в литосфере, флокуляционной очисткой природных и сточных вод от твёрдых примесей, нейтрализацией источников загрязнения воздуха при разложении биологических отходов и др.

Монография предназначена для научных сотрудников, преподавателей и студентов высших учебных заведений, а также инженерно-технических работников, занимающихся проблемами энергосбережения, экологии и техногенной безопасности.

Рекомендовано к печати Ученым советом ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» (Протокол № 8 от 27 сентября 2019)

© ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 2019

© Коллектив авторов, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Список принятых сокращений и обозначений	7
Предисловие.....	8
Раздел 1. Современные проблемы энергосбережения и экологической безопасности	12
1.1. Экологические проблемы энергетики	12
1.2. Энергосбережение	12
1.3. Экологическая безопасность предприятий	13
Раздел 2. Основные положения гидродинамики в цилиндрических трубах.....	15
2.1. Ламинарное стабилизированное движение жидкости	15
2.2. Турбулентное течение.....	16
2.3. Определение коэффициента гидродинамического сопротивления...18	
2.4. Местные сопротивления	20
2.5. Гидравлический расчет трубопроводных систем.....	23
Раздел 3. Возможные способы снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ).....	28
3.1. Модификация параметров стенок.....	28
3.2. Физическое влияние на поток	31
3.3. Изменение свойств транспортируемых жидкостей	34
3.4. Влияние гидродинамически-активных добавок (ГДАД).....	36
Раздел 4. Эффект снижения ГСТТ добавками высокомолекулярных полимеров (ВМП)	43
4.1. Физическая суть эффекта Томса	43
4.1.1. Математические модели течений ньютоновских жидкостей в трубах	43
4.1.2. Потoki жидкостей с ГДАД	45
4.1.3. Математические модели эффекта	47
4.2. Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину.....	53
4.2.1. Основные закономерности	53
4.2.2. Влияние различных факторов	54
Раздел 5. Методы, аппаратура и экспериментальные установки для проведения исследований, характеристика составных компонентов ВПК.....	59
5.1. Общие сведения.....	59
5.2. Свойства составных компонентов ВПК.....	59
5.2.1. Высокомолекулярные полимеры	59
5.2.2. Поверхностно-активные вещества	62
5.2.3. Неорганические соли и щелочи	63
5.2.4. Спирты и органические растворители.....	64
5.2.5. Наполнители	65
5.3. Приготовление растворов гидродинамически активных добавок (ГДАД).....	65

5.4. Методики определения физико-химических свойств ЖВПК и их растворов	66
5.4.1. Микроскопический анализ и турбидиметрия	66
5.5. Полимеросодержание, плотность и вязкость. Реологические свойства	67
5.5.1. Агрегативная и седиментационная устойчивость	67
5.5.2. Скорость и полнота растворения	68
5.5.3. Определение концентрации полимера в растворе	70
5.6. Оценка гидродинамической эффективности растворов ВПК	73
5.6.1. Влияние ГДАД на показания измерительной аппаратуры	73
5.6.2. Турбулентные реометры	74
5.6.3. Трубные стенды	77
5.6.4. Ротационные установки	78
5.7. Метрологическое обеспечение и оценка погрешностей измерений	80
Раздел 6. Снижение ГСТТ в растворах МПАВ	81
6.1. Корреляция между эффектом снижения и $ККМ_2$	81
6.2. Гидродинамическое сопротивление трения	83
6.3. Профили скорости	85
6.4. Спектры энергии	86
6.5. Основные закономерности	89
6.6. Предполагаемый механизм эффекта	90
Раздел 7. Турбулентное трение в водных растворах смесей гидродинамически-активных полимеров и МПАВ	94
7.1. Перспективы применения смесей ГДАД для снижения ГСТТ	94
7.2. Деструкция в мицеллярных растворах ПАВ	94
7.3. Снижение ГСТТ в растворах смесей	97
7.4. Профили скорости и интенсивность турбулентности	99
Раздел 8. Практическое использование эффекта снижения турбулентного трения ГДАД	102
8.1. Возможные варианты эффективного использования эффекта	102
8.2. Гидродинамически-активные композиции	104
8.2.1. Композиции на основе ВМП	104
8.2.2. Композиции на основе МПАВ	105
8.3. Перспективы практического применения полимерных композиций	106
8.3.1. Повышение эффективности работы пожаротушающего оборудования	106
8.3.2. Снижение гидравлических потерь в напорных трубопроводах систем водоотведения и канализации	109
8.3.3. Совершенствование гидроструйных технологий	112
8.4. Практическое применение композиций на основе МПАВ	114
8.4.1. Повышение эффективности работы систем централизованного холодоснабжения	114
8.4.2. Улучшение виброакустических характеристик гидравлических систем	116

8.5. Снижение ГСТТ при гидротранспорте сыпучих материалов	118
8.6. Снижение гидравлических потерь в глинистых и гипсовых растворах	121
8.7. Применение гидродинамически-активных композиций для полимерной локализации токсикантов в литосфере	127
Раздел 9. Применение ВПК для улучшения экологической обстановки на животноводческих комплексах	128
9.1. Общие сведения	128
9.2. Уменьшение выделения вредных и дурнопахнущих газов	129
9.2.1. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды	129
9.2.2. Оценка риска при загрязнении воздуха аммиаком	131
9.2.3. Результаты предварительных экспериментальных исследований	134
9.2.4. Композиция на основе ПЭО для обработки навоза	136
9.3. Очистка навозных стоков свиноводческих комплексов от твёрдых примесей и уплотнение образовавшегося осадка	138
9.3.1. Применение высокомолекулярных ПЭО и ПАА в процессах флокуляционной очистки сточных вод	138
9.3.2. Очистка навозных стоков свинокомплексов модифицированным полиакриламидом (МПАА)	138
9.4. Перспективы применения ершей и флокулянтов для очистки сточных вод	144
Раздел 10. Сопротивление трения и теплообмен в турбулентных потоках водных растворов ВМП и МПАВ	145
10.1. Краткие теоретические сведения по теплофизике	145
10.1.1. Основные теплофизические параметры	145
10.1.2. Теплоотдача и теплопередача. Теплопроводность	148
10.1.3. Теория подобия. Безразмерные величины	153
10.1.4. Конвективный теплообмен	158
10.1.5. Основные уравнения теплопередачи	161
10.2. Влияние ГДАД на теплообмен в потоках жидкостей	162
10.2.1. Коэффициент теплопередачи	162
10.2.2. Профили температур	163
10.2.3. Уменьшение магистральных и диссипативных потерь холода	165
10.2.4. Влияние ГДАД на работу теплообменных аппаратов	170
Список использованных литературных источников	172
Приложения	197
Приложение А. Водорастворимые полимеры для снижения гидродинамического сопротивления	197
Приложение Б. Твердые частицы и композиции на их основе для снижения гидродинамического сопротивления воды	204
Приложение В. Композиции на основе МПАВ для снижения гидродинамического сопротивления трения воды	206

Список принятых сокращений и обозначений

ГСТТ	– гидродинамическое сопротивление турбулентного трения;
СГСТ	– снижение гидродинамического сопротивления трения;
ГДАД	– гидродинамически-активные добавки;
ВМП	– высокомолекулярный полимер;
ПАА	– полиакриламид;
ПЭО	– полиэтиленоксид;
ГС	– гуаровая смола;
ПМС	– пристенный маловязкий слой;
ПС	– пограничный слой;
ПАВ	– поверхностно-активные вещества;
МПАВ	– мицеллообразующие поверхностно-активные вещества;
ВП	– вязкий подслои;
ККМ	– критическая концентрация мицеллообразования;
ЦПХ	– цетилпиридиний хлорид;
МУ	– метаупон;
ПКС	– периодическая коллоидная структура;
ЖВПК	– жидкие водорастворимые полимерные композиции;
ТВПК	– твердые водорастворимые полимерные композиции;
ОКПР	– однородные концентрированные растворы полимеров;
ВКПГ	– высококонцентрированные полимерные гели;
РТПС, РТПЭ	– равноплотные тонкодисперсные полимерные суспензии и эмульсии;
ТВПП	– тонкодисперсные водорастворимые полимерные пасты;
ЖКПП	– жидкие композиции с повышенным содержанием полимера;
УПП (ЛКМ)	– ультраслабые полимерные покрытия, приготовленные нанесением лакокрасочных материалов;
УПП (НПС)	– ультраслабые полимерные покрытия, приготовленные нагреванием полимерных суспензий;
ФПП (ВН)	– флоковые покрытия с водорастворимым полимерным наполнителем;
ТВПБ	– твердые водорастворимые полимерные брикеты;
СМВ	– способствующие мицеллообразованию вещества;
ПС	– пеносмесители;
ГИМ	– гидроимпульсные машины;
ГРМ	– гидрорезающие машины.
ШУКВ	– шахтные установки кондиционирования воздуха;
ВАХ	– виброакустические характеристики;
ССБ	– сульфатно-спиртовая барда;

Предисловие

Начало третьего тысячелетия характеризуется усилением энергетического кризиса, ухудшением экологического состояния окружающей среды. Отсутствие эффективных способов предупреждения и ликвидации последствий природных бедствий (массовых пожаров, землетрясений, наводнений и т.д.) и техногенных катастроф (напр., аварий на АЭС, нефте-, продуктопроводах и т.д.) в последние десятилетия стали важнейшими проблемами фактически для всех государств нашей планеты.

Анализ работы подразделений Министерства по чрезвычайным ситуациям, основной задачей которых является предупреждение аварий техногенного происхождения, внедрение мероприятий и технических средств по уменьшению убытков, защите населения и организации его жизнеобеспечения в случае возникновения аварий, катастроф, крупных пожаров, стихийных бедствий, в т.ч и в военное время, указывает на необходимость создания более эффективных энергосберегающих технологий и технологий по защите окружающей среды.

Понятие энергетика, энергосбережение и экология органично и неразрывно связаны. Используемые на сегодняшний день способы выработки энергии, в основном, обеспечиваются за счёт трёх видов энергоресурсов – органического топлива, энергии потока воды и энергии атомного ядра. При этом следует отметить, что все эти способы сопровождаются загрязнением окружающей среды.

Энергия воды и атомная энергия преимущественно используются после их превращения в электрическую. В тоже время значительное количество энергии, заключенное в органическом топливе, используется в виде тепловой и только часть её превращают в электрическую. Высвобождение энергии из органического топлива связано с его сжиганием и, следовательно, с поступлением продуктов сгорания в окружающую среду в результате чего ей наносится существенный вред.

В последние годы ведущими странами мира было принято ряд обязательств и подписаны соглашения в основе которых лежит уменьшение выбросов вредных веществ в окружающую среду и, как следствие этого, контроль над глобальным потеплением. Главным в этом вопросе является тот факт, что изменение климата может находиться под контролем государств.

По Киотскому Протоколу договаривающиеся страны определили для себя пределы по ограничению или уменьшению совокупного среднего уровня выбросов в атмосферу шести газов: CO₂, CH₄, гидрофторуглеродов, перфторуглеродов, N₂O, SF₆ на 5,2% в период с 1 января 2008 года по 31 декабря 2012 года, по сравнению с уровнем 1990 года. Государства ЕС приняли поправку к Директиве от 23.04.2009 г., в которой обязались уменьшить эмиссию углекислого газа (CO₂) до 2020 года на 20%.

В качестве примера следует отметить, что только в Украине эмиссия углекислого газа составляла в 2008 году около 486 млн. тонн, величина которой на сегодняшний день практически не изменилась.

В связи с вышеизложенным перед учёными всего мира стоит задача разработки экологически чистых способов получения энергии, энергосберегающих и техногенно-безопасных технологий, а также эффективных технических средств по предупреждению и ликвидации последствий стихийных бедствий и техногенных аварий (катастроф), в т.ч. и с ограниченным потреблением электроэнергии.

Недостаточная эффективность, с экологической точки зрения, технологий и технических средств, используемых в промышленных масштабах и для решения техногенно-экологических проблем, ставит под угрозу национальную безопасность даже в развитых странах мира.

Кроме предприятий, вырабатывающих энергию, значительно загрязняют окружающую среду: промышленные объекты и процессы, связанные с добычей полезных ископаемых, транспортировкой нефти и нефтепродуктов, а также канализационные системы при авариях и т.д.

В связи с вышеуказанным возникает необходимость в разработке энергосберегающих технологий, технологий по защите окружающей среды от загрязнения вредными стоками, газами и пылью, высокоэффективных технических средств для предупреждения и незамедлительной ликвидации последствий стихийных бедствий и техногенных катастроф. Данные вопросы можно решить за счет подавления турбулентности, приводящего, в конечном итоге, к существенному снижению гидродинамического сопротивления. Последнее достигается путём введения в турбулентный поток жидкости незначительного количества растворимых в ней полимеров большой молекулярной массы [1-7] или поверхностно-активных веществ (ПАВ) [4,6,7,8-11], создания демпфирующих (податливых) покрытий [12-14], воздействия на пристенные течения газовыми микропузырьками [15]. Возможно и совместное использование податливого покрытия, микропузырьков газа и полимерных добавок [16].

Для проведения эффективного анализа влияния гидродинамически-активных добавок (ГДАД) на величину снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) и процессы теплообмена в монографии приведены основные положения технической гидромеханики и теплотехники, опубликованные в работах [17-21].

Наиболее перспективным и простым в реализации методом решения вышеупомянутых проблем является способ снижения ГСТТ, а, следовательно, и энергозатрат, за счёт введения в турбулентную жидкость малых ($\approx 0,0001-0,01$ % по весу) добавок водорастворимых высокомолекулярных полимеров. Это достигается путём дозированного ввода концентрированных полимерных растворов в технологические трубопроводы или проточные части гидравлических устройств и машин.

Однако, с точки зрения практического применения, этому способу присущи определённые ограничения и недостатки, связанные с деструкцией (разрушением) полимерных молекул и длительностью процесса приготовления (по классической схеме) из порошкообразного полимера растворов требуемых концентраций.

Деструкция присуща всем полимерам большой молекулярной массы, особенно интенсивно она протекает при больших сдвиговых напряжениях в течениях, реализуемых в проточных частях гидравлических устройств и машин [22-27]. В связи с этим добавки полимеров целесообразно использовать в системах и машинах, где силовое воздействие на полимерные молекулы сведено к минимуму. Такими являются системы водяного пожаротушения, канализации, аварийной откачки вод и др.

Длительность процесса приготовления полимерного раствора (по классической схеме) обусловлена низкой скоростью набухания полимерного порошка, образованием труднорастворимого геля и необходимостью его последующего дорастворения при перемешивании [28-34] раствора, что требует применения специального оборудования.

С учётом вышеизложенного авторами настоящей монографии были выполнены комплексные исследования, направленные на совершенствование процессов растворения и дозирования высокоэффективных полимеров, таких как полиэтиленоксид и полиакриламид. С этой целью были разработаны жидкие, пастообразные и твёрдые гидродинамически-активные полимерные композиции, позволяющие за малые промежутки времени получать растворы полимеров требуемых концентраций [7,35-45].

Классическими примерами применения гидродинамически-активных полимерных композиций являются системы водяного пожаротушения, канализации, аварийной откачки вод и подачи гипсовых растворов по трубопроводам. Во всех этих системах за счёт применения композиций существенно снижаются энергозатраты на транспортировку соответствующих жидких сред, а также на 60-80% уменьшить гидравлические потери. Кроме того, добавки полимеров значительно улучшают огнетушащие свойства жидкостей [41-48].

Авторами монографии были также выполнены исследования по применению ГДАД для совершенствования процессов гидроразрушения полезных ископаемых, горных пород и гидрорезания твёрдых материалов. Так, например, за счёт введения в рабочую жидкость (воду) полимерных композиций эффективность работы импульсного гидромонитора (без изменения его конструкции) увеличивается почти в 2 раза [49-56]. Использование в гидроразрезном оборудовании рабочих жидкостей на основе растворов гидродинамически-активных полимерных композиций позволяет существенно повысить эффективность процесса резания твёрдых материалов: либо за счёт снижения энергозатрат при сохранении

параметров процесса резания; либо за счёт увеличения глубины реза и уменьшения его ширины при неизменном энергопотреблении [53-56]. Применение ГДАД оказывается эффективным и при подводной резке материалов, в частности стержней-поглотителей нейтронов, используемых в реакторах атомных электростанций.

Наряду с полимерами, свойством уменьшать гидродинамическое сопротивление жидкостей обладают добавки мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ). Существенным их преимуществом является то, что добавки МПАВ сохраняют во времени свою гидродинамическую эффективность в замкнутых трубопроводных системах холодо- и теплоснабжения, включающих насосы для перекачки жидких сред [4,6-11,57-68]. Это обусловлено эффектом так называемой "обратимой деструкции". Сущность его состоит в том, что мицеллярные структуры МПАВ, ответственные за снижение сопротивления, в проточных частях насосов разрушаются (как и полимерные молекулы), но после снятия больших сдвиговых напряжений (за насосами) восстанавливаются и начинают вновь подавлять турбулентность в трубопроводах тепло- и холодоснабжения (в отличие от полимеров, для которых деструкция имеет необратимый характер)[62-68].

Разработанные авторами ВПК, наряду с использованием в гидравлических системах, имеют перспективы широкого практического применения при решении целого ряда экологических задач. В первую очередь, к ним следует отнести: очистку природных и сточных вод от взвешенных частиц и уплотнение образующегося осадка; уменьшение выветривания тонкодисперсных фракций при транспортировке сыпучих материалов; локализацию источников загрязнения грунта токсичными жидкостями; нейтрализацию источников загрязнения воздуха (например, при разложении биологических отходов); улучшение виброакустических характеристик гидравлических систем и др. [69-78].

Практическое применение ТВПК существенно упрощает и ускоряет процессы приготовления полимерных растворов. Это позволило создать мобильную установку для реагентной очистки различных сточных вод, которые после удаления взвешенных загрязняющих веществ используются для технических целей [79-80]. В перспективе такие установки могут быть использованы и для подготовки питьевой воды.

Важную роль при практическом применении явления снижения сопротивления трения играет правильный выбор гидродинамически-активных материалов для каждого конкретного случая их использования. При этом для достижения максимальной величины эффекта снижения сопротивления необходимо учитывать, в каком диапазоне чисел Рейнольдса, при каких температурах, значениях водородного показателя среды, солёности растворов будут использоваться гидродинамически-активные добавки и композиции на их основе.

Раздел 1. Современные проблемы энергосбережения и экологической безопасности [7]

1.1. Экологические проблемы энергетики

Технический прогресс неразрывно связан с увеличением производства и потребления энергии, которые удваиваются каждые 12-15 лет. При этом энерговооружённость промышленных предприятий лавинообразно увеличивается с каждым годом.

Рост промышленного производства, увеличение численности транспорта оказывает отрицательное влияние на жизнь людей, изменяя среду их обитания. В связи с этим, с увеличением производства и потребления энергии, окружающей среде неизбежно наносится значительный ущерб.

Ведущие учёные всего мира утверждают, что самым масштабным и опасным аспектом загрязнения атмосферы являются продукты сгорания органического топлива, которые приводят к так называемому «парниковому эффекту» ущерб от которого окружающей среде трудно переоценить.

В современной энергетике остро стоят вопросы: о влиянии на биосферу и отдельные её элементы энерговырабатывающих предприятий, уменьшения отрицательного воздействия на окружающую среду современных методов получения и использования энергии, решение проблемы производства энергии за счёт альтернативных (нетрадиционных) ресурсов, таких как энергия солнца, ветра, термальных вод и др. источников, которые относятся к неисчерпаемым и экологически чистым.

На сегодняшний день можно выделить следующие пути решения экологических проблем современной энергетике: эффективное использование и совершенствование очистных сооружений и устройств; уменьшение поступления в окружающую среду загрязняющих веществ; экономия электроэнергии за счёт снижения энергоёмкости получаемых изделий; переход на наукоёмкие технологии.

1.2. Энергосбережение

Энергосбережение (экономия энергии) - это реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) её использование; экономное расходование топливно-энергетических ресурсов, а также на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии. Энергосбережение — важная задача по сохранению природных ресурсов.

В настоящее время остро стоит вопрос применения энергосберегающих технологий во всех отраслях экономики. Это связано с

тем, что энергосбережение в первую очередь влияет на бюджетные расходы страны, её энергозатраты, экологическую ситуацию. Поэтому необходимо максимально использовать мировую практику эксплуатации энергосберегающих систем и технологий, существующую на данный момент. Известно, что внедрение инновационных энергосберегающих технологий снижает расход электроэнергии на промышленных объектах и позволяет снизить затраты на производство продукции предприятий. При этом следует отметить, что, эффективно снижая потребление энергии предприятиями и населением, отпадает необходимость в строительстве новых источников её генерации и тем самым сохранить экологический баланс в соответствующих регионах нашей планеты.

Существует два пути решения возникшей проблемы: первый — крайне капиталоемкий путь наращивания добычи нефти, угля и газа, а также строительство новых объектов электрогенерации; второй — существенно менее затратный, связанный с обеспечением экономического роста за счёт повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов. Следует отметить, что на практике необходим симбиоз первого и второго вариантов с несомненным приоритетом энергоэффективности.

Так, например, суммарное энергопотребление Украины в последние годы составило порядка 990 млн. тонн условного топлива (т.у.т.). При доведении внедрения энергосберегающих и энергоэффективных технологий и оборудования до уровня в странах — членах ЕС, энергопотребление снизилось бы до 650 млн. т.у.т. Другими словами, около 35% энергии в Украине неоправданно теряется.

Значительная часть электроэнергии во всём мире потребляется трубопроводным транспортом (системы тепло- и холодоснабжение, гидротранспорт сыпучих материалов, системы канализации, водоотведения и т.д.). В таких системах большая часть энергии затрачивается на преодоление сил гидродинамического сопротивления трения.

Важным резервом повышения эффективности работы гидравлических систем, в т.ч. и за счёт уменьшения энергопотребления, является использование методов и средств по снижению гидравлических потерь в трубопроводах и проточных частях гидромашин. Один из таких способов повышения эффективности работы основан на эффекте Томса — явлении снижения гидродинамического сопротивления трения жидкостей микродобавками высокомолекулярных полимеров.

1.3. Экологическая безопасность предприятий

Технический прогресс приводит к повышению уровня опасности для людей и окружающей среды. Опасность техногенного характера может возникнуть вследствие аварий на промышленных объектах, на

коммунальных системах жизнеобеспечения людей, магистральных трубопроводах, крупных животноводческих комплексах и т.д.

Опасными, с техногенной точки зрения, являются также технологические процессы, в которых используются радиоактивные, химически опасные, пожароопасные и взрывчатые вещества. Таким образом, развивая такие отрасли промышленности, как газо-, нефте-химическую, энергетическую, металлургическую и т.д. человечеству приходится решать проблемы предупреждения и ликвидации последствий аварий техногенного характера. При неблагоприятном стечении обстоятельств даже небольшая аварийная ситуация может повлечь за собой катастрофу национального масштаба. В связи с вышеизложенным во всем мире из года в год ужесточаются нормы техногенной безопасности, разрабатываются прогрессивные технологии по её предупреждению.

Основными причинами возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются: недостаточное выполнение и нарушение требований технологии производства при значительном моральном и физическом износе большинства основных производственных фондов предприятий; недостаточное материально-техническое обеспечение производства и низкий уровень его культуры; неудовлетворительное состояние хранения, утилизации и переработки отходов; игнорирование природных и экологических факторов, требований государственных и отраслевых стандартов, техники безопасности, других норм; недостаточное внимание за проведением комплекса предупреждающих мероприятий, направленных на предотвращение возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера и уменьшения негативных последствий от них.

Особое место при решении проблем техногенной безопасности занимают технологические комплексы, которые характеризуются наличием не только опасных веществ в применяемых технологиях, но и опасностью самих технологий, т.е. объекты таких комплексов работают при повышенных температурах, давлениях, концентрациях вредных веществ и т. д., что уже само является опасным производственным фактором. Именно таким системам целесообразно уделять наибольшее внимание при решении вопросов обеспечения техногенной безопасности. Результаты, полученные при решении задач для таких комплексов, могут быть применены для более простых систем, что является несомненным достоинством решения проблем именно в этом направлении.

Раздел 2. Основные положения гидродинамики в цилиндрических трубах [17-21]

2.1. Ламинарное стабилизированное движение жидкости

При ламинарном стабилизированном режиме течения частицы жидкости движутся вдоль оси трубы параллельно друг другу, не смешиваясь и огибая все встречающиеся на пути препятствия. При этом скорость потока и профиль скоростей не зависят от продольной координаты.

Распределение скоростей по поперечному сечению трубы параболическое:

$$u = \frac{1}{4\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l} (r_1^2 - r^2) , \quad (2.1)$$

где u - местная скорость на расстоянии r от оси; η - динамический коэффициент вязкости; Δp - перепад давления в трубе длиной l ; r_1 - радиус трубы.

Осевая скорость определяется по формуле

$$u_o = \frac{\Delta p}{4\eta l} r_1^2 . \quad (2.2)$$

Количество жидкости Q , протекающей в единицу времени через трубу, описывается уравнением Пуазейля

$$Q = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l} r_1^4 = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{l} \left(\frac{d_1}{2}\right)^4 , \quad (2.3)$$

а величина Δp равна:

$$\Delta p = 8 \frac{Q l \eta}{\pi r_1^4} , \quad (2.4)$$

где d_1 - диаметр трубы.

Можно представить расход Q как произведение средней скорости $u_{\text{ср}}$ на величину площади сечения трубы:

$$Q = u_{\text{ср}} \pi r_1^2 . \quad (2.5)$$

Из формулы (2.3) и выражения (2.5) находим среднюю скорость

$$u_{\text{ср}} = \frac{\Delta p}{8\eta l} r_1^2 . \quad (2.6)$$

Из анализа формул (2.2) и (2.6) вытекает очень важное свойство ламинарного установившегося движения жидкости в круглой трубе: максимальная скорость на оси трубы в два раза больше средней расходной скорости ($u_{\text{max}} = 2u_{\text{ср}}$).

Для установившегося движения в цилиндрических трубах сопротивление на данном участке определяется по формуле (2.4) или перепадом давления на этом участке:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u_{\text{cp}}^2}{2}, \quad (2.7)$$

$$\Delta p = \psi \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho u_{\text{max}}^2}{2}, \quad (2.8)$$

где λ и ψ - коэффициенты сопротивления; ρ - плотность движущейся среды.

Приравняв правые части уравнений (2.7) и (2.8) и имея в виду, что $u_{\text{max}} = 2u_{\text{cp}}$, получаем отношение между коэффициентами λ и ψ : $\lambda = 4\psi$.

Определив величину Δp из формулы (2.6) и приравняв полученные значения правой части выражения (2.7), найдем:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u_{\text{cp}}^2}{2} = \frac{8\eta l}{r_1^2} u_{\text{cp}} = 64 \frac{\eta}{\rho u_{\text{cp}} d} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho u_{\text{cp}}^2}{2},$$

откуда следует что, коэффициент сопротивления

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (2.9)$$

где $Re = \frac{u_{\text{cp}} d}{\nu}$ - число Рейнольдса, составленное по расходной скорости u_{cp} и диаметру трубы.

Выражение (2.9) называется законом сопротивления ламинарного движения жидкости в цилиндрической трубе. Верхний предел применимости этого закона определяется критерием Re , который для перехода ламинарного движения в турбулентное дает критическое значение $Re_{\text{кр}} = 2320$. В других работах оно колеблется около 2000.

2.2. Турбулентное течение

При турбулентном режиме течения жидкости поток движется беспорядочно. Каждая частица жидкости, участвуя в общем продольном движении, совершает также поперечные колебания. Точного теоретического решения для турбулентного движения в трубах не существует. Все формулы и закономерности получены либо непосредственно из опыта, либо имеют полуэмпирический характер, т.е. каждому профилю скорости соответствует свой закон сопротивления. Простым, но далеко не универсальным профилем скоростей при турбулентном движении в трубе является так называемый степенной профиль.

Этот профиль при числах $Re \approx 5 \cdot 10^4$ описывается уравнением

$$u = u_{max} \left(\frac{r}{r_1} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.10)$$

или в общем виде выражением

$$u = u_{max} \left(\frac{r}{r_1} \right)^n ,$$

где n – показатель степени, который изменяется от $1/7$ до $1/10$ при возрастании Re от $25\ 600$ до $3\ 070\ 000$.

Сопротивление гладких труб изучалось многими исследователями. Из предложенных формул можно выделить степенной закон сопротивления Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} , \quad (2.11)$$

который справедлив в области $Re_{кр} < Re < 5 \cdot 10^5$.

Наиболее распространен логарифмический закон сопротивления Прандтля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A \lg(Re\sqrt{\lambda}) + B , \quad (2.12)$$

где A и B – численные значения в логарифмическом законе сопротивления.

Никурадзе, после тщательной обработки результатов своих опытов и многочисленных экспериментов других авторов, пришел к выводу, что наилучшее приближение к опыту дает закон сопротивления Прандтля в виде:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 0,8 . \quad (2.13)$$

Формула (2.13) неудобна для инженерных расчетов, так как зависимость величины λ от числа Re дана в неявном виде. Для устранения этого недостатка Никурадзе формулу (2.13) привел к виду

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} . \quad (2.14)$$

Более универсальной, пригодной для широкого диапазона чисел Re и охватывающей все возможные случаи при турбулентном режиме движения является формула А.Д. Альтшуля, основанная на широком опытном материале:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25} , \quad (2.15)$$

где Δ_3 - эквивалентная шероховатость трубы; d - диаметр трубы.

Кроме приведенных, применяются и другие формулы:

П.К. Конакова

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}, \quad (2.16)$$

ВНИИГаз

$$\lambda = \frac{0,224}{Re^{0,185}}, \quad (2.17)$$

Биддиссона

$$\lambda = \frac{0,1159}{Re^{0,154}}, \quad (2.18)$$

Г.А. Мурина

$$\lambda = \frac{1,01}{(\lg Re)^{2,5}}, \quad (2.19)$$

Кольбрука

$$\frac{1}{\lambda} = 1,8 \lg \frac{Re}{7}. \quad (2.20)$$

Потери давления Δp в трубе с заданным поперечным сечением и длиной l , определяются по формуле

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{4R} \cdot \frac{\rho u_{cp}^2}{2}. \quad (2.21)$$

Несмотря на многочисленные исследования турбулентного движения жидкости, строгая его теория до настоящего времени отсутствует. Поэтому при гидравлических расчетах турбулентных потоков наряду с полуэмпирическими формулами приходится пользоваться экспериментальными данными.

2.3. Определение коэффициента гидродинамического сопротивления

Потери напора h_{mp} при движении жидкости в трубах в турбулентном и ламинарном режимах определяются с помощью универсального уравнения Дарси – Вейсбаха:

$$h_{тр} = \lambda \left(\frac{l}{d} \right) \left(\frac{v^2}{2g} \right).$$

При этом следует отметить, что коэффициент гидродинамического сопротивления трения λ , входящий в формулу, для турбулентного потока

жидкости вычисляется совершенно по-иному, чем для ламинарного режима течения.

Многочисленными исследованиями установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления λ в общем случае зависит не только от Re , но и от шероховатости стенки трубы.

Впервые исчерпывающие данные о зависимости $\lambda=f(Re)$ получены Никурадзе на трубах с искусственной шероховатостью. В дальнейшем Г. А. Мурин, в исследованиях гидравлических сопротивлений в обычных промышленных стальных трубах, не только подтвердил основные закономерности, установленные Никурадзе, но и показал, что для труб с естественной шероховатостью коэффициент λ в переходной области оказывается всегда больше, чем в квадратичной, и при переходе из первой области во вторую непрерывно снижается (рис. 2.1).

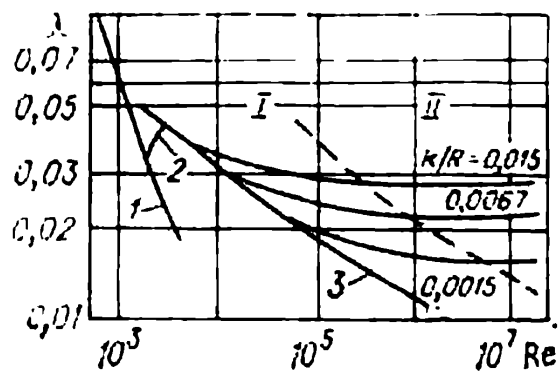


Рисунок 2.1 Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления λ от Re .

1 - ламинарный режим; 2 - переходная зона; 3 - турбулентный режим (гладкие трубы); штриховая - условная граница между докватратичной областью шероховатых (I) и квадратичной областью вполне шероховатых (II) труб.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 2.1, позволяют всю область чисел Re разделить на пять зон, в каждой из которых наблюдаются различные зависимости $\lambda=f(Re)$. При ламинарном режиме в круглых трубах для определения коэффициента λ применяют формулу Пуазейля (см. рис. 2.1, кривая 1). Расчетной зависимостью для λ в области гидравлически гладких труб служит формула Блазиуса (см. рис. 2.1, кривая 3)

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (2.22)$$

Для определения λ в области шероховатых труб пользуются формулой А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_1}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (2.23)$$

где k_1 — эквивалентная шероховатость.

В области вполне шероховатых труб значения коэффициента λ располагаются параллельно оси абсцисс. Для определения λ в этой зоне используется формула Никурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,74 + 2 \lg \frac{1}{\varepsilon}. \quad (2.24)$$

Перечисленные выше формулы (2.22)—(2.24) имеют ограниченную область применения и пригодны лишь для отдельных зон турбулентного режима. Поэтому представляет интерес универсальная формула Кольбрука и Уайта, применимая для всей области турбулентного режима течения:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{k_1}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right). \quad (2.25)$$

Формула (2.25) принята в настоящее время в качестве основной для гидравлического расчета трубопроводов.

2.4. Местные сопротивления [19]

Местными сопротивлениями называют различные препятствия в трубопроводах — вентили, колена, краны и т.д.

При течении вязкой жидкости через местные сопротивления, т.е. через места резкого изменения формы пограничных поверхностей труб и каналов, как, например, расширения, сужения, повороты, изломы и т.п., изменяется поле скоростей потока и чаще всего образуются области, заполненные крупными и мелкими вихрями.

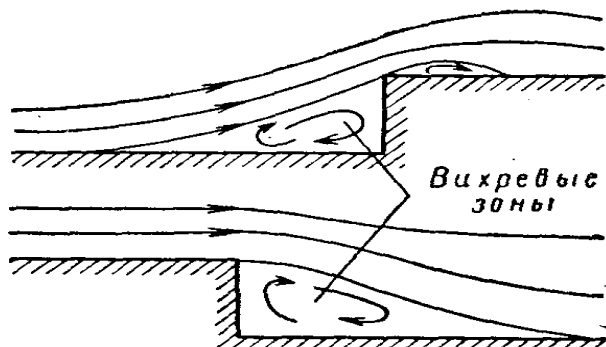


Рисунок 2.2 Структура течения через уступ.

Кинематическая структура течения, с образованием отрывов потока от стенок и вихревых зон, схематически показана на рис. 2.2 (течение через

уступ), рис. 2.3 (течение в диффузоре), рис. 2.4 (течение через внезапное сужение).

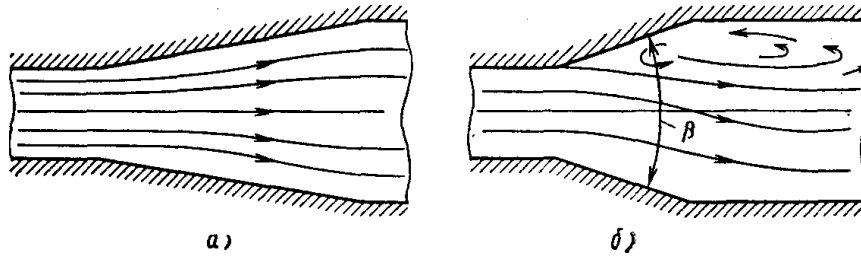


Рисунок 2.3 Схемы течения в диффузоре.

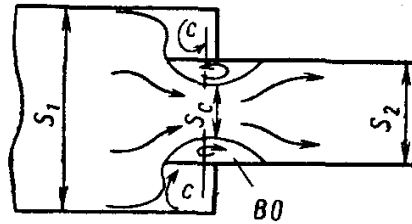


Рисунок 2.4 Схема потока на участке внезапного сужения трубы.

Во всех случаях можно увидеть образование отрывов и вихревых зон. Крупные вихри интенсифицируют процесс диссипации энергии, благодаря чему потери в местных сопротивлениях, где указанные явления возникают, могут намного превосходить потери по длине на участке той же протяженности, что и местное сопротивление.

Структура потока, размеры и интенсивность вихрей существенно зависят от режима течения, т.е. от числа Рейнольдса.

Для самых разнообразных местных сопротивлений зависимость этих потерь от скорости можно считать квадратичной и записать в виде:

$$h_{\mu} = \xi \frac{V^2}{2g}, \quad (2.26)$$

где V – средняя скорость потока после местного сопротивления; ξ – коэффициент местного сопротивления.

При внезапном расширении потока от сечения F_1 к F_2 коэффициент ξ можно рассчитать по формуле: $\xi = \left(\frac{F_1}{F_2} - 1\right)^2$.

В диффузоре – коническом расширении трубы от сечения F_1 к F_2 – коэффициент местного сопротивления вычисляется по формуле:

$$\xi = k \left(\frac{F_1}{F_2} - 1\right)^2, \quad (2.27)$$

где k – экспериментальный коэффициент. Его зависимость от угла раствора конуса 2θ приведена в таблице 2.1, где θ – угол между осью и образующей конуса.

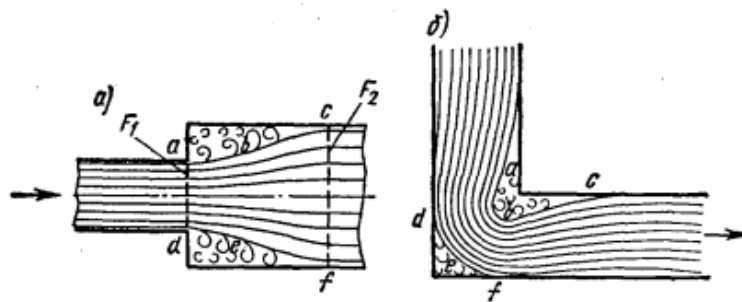


Рисунок 2.5 Местные сопротивления: а) расширение трубы; б) колено.

Для закруглений трубопровода с углом поворота φ^0 коэффициент ξ можно определить по формуле Вейсбаха:

$$\xi = \left[0,131 + 0,163 \left(\frac{d}{r} \right)^{3,5} \right] \frac{\varphi^0}{90^0}, \quad (2.28)$$

где d - диаметр трубы, r - радиус скругления.

Таблица 2.1

Угол $2\theta^0$	Коэффициент k	Угол $2\theta^0$	Коэффициент k
5	0,13	70	1,13
15	0,26	90	1,07
30	0,71	120	1,05
50	1,03	160	1,02

В качестве примера на рис. 2.6 приведена зависимость коэффициента сопротивления для тройника, шарового клапана, угольника, разъемного клапана и диафрагмы.

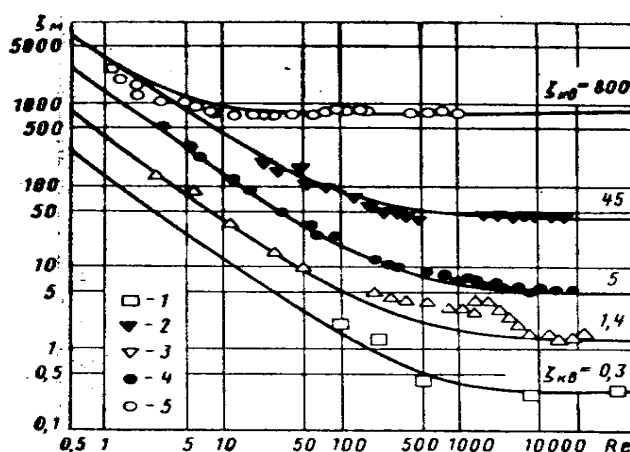


Рисунок 2.6 Зависимость коэффициентов местных сопротивлений от числа Рейнольдса: 1 – тройник; 2 – шаровой клапан; 3 – угольник 90^0 ; 4 – разъемный клапан; 5 – диафрагма ($n = d_{\text{отв}}^2 / d_{\text{тр}}^2 = 0,05$; $Re = v d_{\text{тр}} / \nu$, где $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия; $d_{\text{тр}}$ – диаметр трубы).

Видно, что с увеличением числа Рейнольдса величина коэффициента для всех видов сопротивлений уменьшается (особенно это наглядно при течении жидкости через тройник). Для случая диафрагмы эта зависимость не так явно выражена, а коэффициент ξ остается самым большим из всех испытанных видов сопротивлений и во всем диапазоне чисел Рейнольдса.

Величины коэффициентов различных местных сопротивлений можно найти в специальных справочниках [20,21].

2.5. Гидравлический расчет трубопроводных систем [17]

Встречающиеся в технике гидравлические системы можно условно разделить на две группы:

а) простые трубопроводы, которые представляют собой одну или несколько последовательно соединенных труб, не имеющих боковых ответвлений на всем протяжении от точки забора A до точки потребления B (см. рис. 2.7);

б) сложные трубопроводы, образующиеся в результате разветвлений, параллельных соединений, боковых отводов или замыканий в кольца труб разных длин и диаметров. (см. рис. 2.8 а, б)

При расчете гидравлических систем возникают три основных задачи:

- 1) определение потерь напора, необходимого для пропуска (подачи) заданного расхода жидкости по трубопроводу;
- 2) определение расхода жидкости при заданном перепаде давления;
- 3) определение оптимального сечения трубопровода.

Простые водопроводы. Простым водопроводом называют трубопровод, не имеющий точек разветвления на всем протяжении от точки забора A до точки потребления B (рис. 2.7)

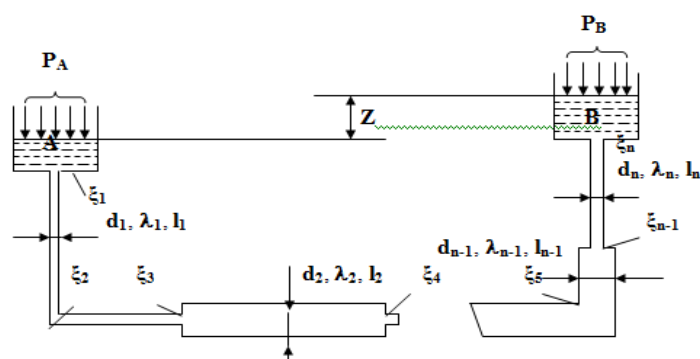


Рисунок 2.7 Принципиальная схема простого водопровода

Рассмотрим трубопровод, состоящий из n участков труб с коэффициентами сопротивления трения $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, длинами l_1, l_2, \dots, l_n и диаметрами d_1, d_2, \dots, d_n . Пусть кроме этого, в трубопроводе имеется m местных сопротивлений с коэффициентами $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$.

Если по рассматриваемому трубопроводу поднимают воду на высоту Z , то при стационарном течении полная потеря напора составит:

$$\Delta H = \frac{P_A - P_B}{\rho g} = Z + \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i V_i^2}{d_i 2g} + \sum_{k=1}^m \xi_k \frac{V_k^2}{2g} . \quad (2.29)$$

Формула (2.29) справедлива при условии, что резервуары достаточно больше (по сравнению с трубами). Поэтому можно считать жидкость в них покоящейся и можно пренебречь начальным и конечным динамическими напорами. Если в формуле (2.29) $Z < 0$, то это означает, что точка потребления находится ниже точки забора.

Выразив с помощью уравнения неразрывности $V_1 F_1 = V_2 F_2 = \dots = V_n F_n$ все скорости V_i через одну, например V_1 , получим

$$\Delta H = \frac{P_A - P_B}{\rho g} = Z + \frac{V_1^2}{2g} \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \left(\frac{F_1}{F_i} \right)^2 + \sum_{k=1}^m \xi_k \left(\frac{F_1}{F_k} \right)^2 \right] . \quad (2.30)$$

Если выражение в квадратных скобках обозначить через $\xi_{\text{сист}}$, то

$$\Delta H = \frac{P_A - P_B}{\rho g} = Z + \xi_{\text{сист}} \frac{V_1^2}{2g} . \quad (2.31)$$

Так как $Q = V_1 F_1$, то формулу (2.31) можно переписать в виде

$$\Delta H = \frac{P_A - P_B}{\rho g} = Z + \xi_{\text{сист}} \frac{Q^2}{2g F_1^2} . \quad (2.32)$$

Решив уравнения (2.32) относительно Q , найдем

$$Q = \frac{F_1}{\sqrt{\xi_{\text{сист}}}} \sqrt{2g(\Delta H - Z)} . \quad (2.33)$$

Формулы (2.32) и (2.33) решают первую и вторую из поставленных выше задач.

Решение третьей задачи сводится к определению оптимального диаметра трубопровода при заданном расходе жидкости. Подачу заданного количества жидкости можно осуществить через трубопроводы различных диаметров. Чем меньше будет диаметр трубопровода, тем меньше потребуется металла на его изготовление и соответственно снизится его стоимость. Однако при заданном расходе жидкости с уменьшением диаметра трубопровода увеличивается и скорость ее течения, а, следовательно, увеличиваются и потери напора, так как по формуле (2.31) потери напора пропорциональны квадрату скорости течения жидкости.

Из вышеизложенного следует, что для прокачивания жидкости трубопроводу меньшего диаметра потребуются более мощные насосы, развивающие более высокое давление и потребляющие больше энергии. Таким образом, видно, что экономия на стоимости трубопровода одновременно приводит к удорожанию стоимости насосной установки и повышению эксплуатационных расходов. Поэтому задача о выборе

диаметра трубопровод требует для своего решения технических и экономических расчетов.

Очевидно, что существует какой-то диаметр трубопровода, при котором сумма затрат средств на перекачивание жидкости, амортизацию насосных установок и трубопровода и их ремонт будут минимальными. Этот диаметр и будет оптимальным диаметром трубопровода.

Используя формулу (2.33) и выразив в ней площадь F_1 через диаметр d , можно написать

$$Q = VF = V \left(\frac{\pi d^2}{4} \right), \quad (2.34)$$

откуда

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}, \quad (2.35)$$

где d - внутренний диаметр, трубопровода, м; Q - расход жидкости, м³/сек; V - скорость жидкости, м/сек.

Задаваясь несколькими значениями скорости V , определяют по формуле (2.35) расчетное значение соответствующих диаметров трубопровода. Изучая и сравнивая все экономические показатели полученных вариантов трубопроводов различных диаметров, принимают тот из них, который является оптимальным.

Результаты исследований показали, что оптимальный диаметр трубопровода соответствует скорости течения жидкости $V=1$ м/сек.

Сложные трубопроводы. В качестве примера сложного трубопровода рассмотрим разветвленный (рис. 2.8, а) и параллельный трубопроводы (рис. 2.8, б).

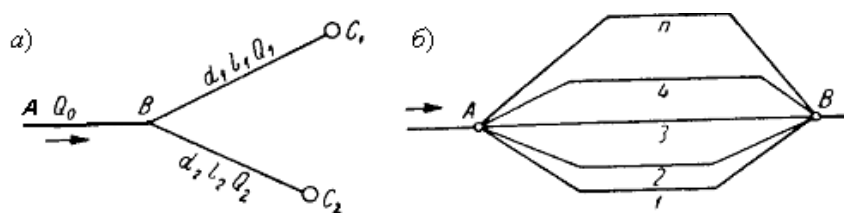


Рисунок 2.8

В первом случае жидкость от насосной станции A подается с секундным объемным расходом Q_0 двум потребителям в точках C_1 и C_2 , удаленным от точки разветвления B на расстояния l_1 и l_2 по трубопроводам с диаметрами d_1 и d_2 . Требуется узнать величину объемных расходов жидкости Q_1 и Q_2 , проходящих по каждому трубопроводу в отдельности. Для простоты будем считать, что точки B , C_1 и C_2 , находятся на одном

уровне и режим движения (ламинарный или турбулентный) в обеих трубах один и тот же.

Так как в начале и в конце трубопроводов BC_1 и BC_2 давления одинаковы, то, следовательно, при любых режимах движения перепады давлений по всей длине трубопроводов тоже будут одинаковы. Тогда, используя формулу Дарси-Вейсбаха и приравнявая перепады, можно записать уравнение

$$\Delta P = \frac{8}{\pi^2} \lambda_1 \frac{\rho Q_1^2}{d_1^5} l_1 = \frac{8}{\pi^2} \lambda_1 \frac{\rho Q_2^2}{d_2^5} l_2 , \quad (2.36)$$

откуда

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{\frac{1}{2}} . \quad (2.37)$$

Если движение в обоих трубопроводах турбулентное, то

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \left(\frac{u_{cp1} d_1}{u_{cp2} d_2}\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.38)$$

и по (2.37)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{19}{7}} \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^{\frac{4}{7}} . \quad (2.39)$$

Для ламинарного движения в обеих трубах соответственно будет:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{Q_1 d_2}{Q_2 d_1}; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 \frac{l_2}{l_1} . \quad (2.40)$$

Имея и виду, что $Q_1 + Q_2 = Q_0$ и подставив значение Q_2 в соответствующие формулы, окончательно получим для турбулентного движения

$$Q_1 = \frac{Q_0}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{\frac{19}{7}} \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{\frac{4}{7}}} , \quad (2.41)$$

для ламинарного

$$Q_1 = \frac{Q_0}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 \frac{l_1}{l_2}} . \quad (2.42)$$

Если обе трубы шероховаты и величины относительной шероховатости одинаковы, то при режиме развитой шероховатости

$$\lambda_1 = \lambda_2 ,$$

тогда из (2.37) следует, что

$$Q_1 = \frac{Q_0}{1 + \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{\frac{5}{2}} \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{\frac{1}{2}}} . \quad (2.43)$$

Последняя формула справедлива независимо от режима движения во всех случаях, когда $\lambda_1 = \lambda_2$.

Из приведенных формул видно, что в равных по длине и диаметру гладких трубах при одинаковых режимах движения и в трубах с одной и той же относительной шероховатостью (при режиме развитой шероховатости)

$$Q_1 = Q_2 = 0.5Q_0 . \quad (2.44)$$

Аналогичные зависимости можно получить, используя (2.37) и для случая, когда режимы движений в параллельных трубопроводах различны.

В качестве сложного трубопровода рассмотрим также трубопровод с параллельными ветвями, показанный на рис. 2.8, б. Будем считать, что для такого трубопровода заданы общие расходы Q_0 , длина и диаметр каждой трубы между точками A и B .

Найдем распределение расходов по трубам $1, 2, 3, \dots, n$ и перепад давления между точками A и B .

Воспользовавшись формулой Дарси-Вейсбаха, можно получить систему уравнений, определяющих расход через каждую параллельную трубу в виде

$$Q_i^2 = \frac{\pi^2 d^4}{8\lambda l \rho} h_\tau . \quad (2.45)$$

Задавая значения λ и имея в виду, что для всех труб h_τ будет одинаковым, получим систему с количеством уравнений n , равным количеству параллельных труб. Так как h_τ тоже неизвестная величина, то для решения задачи необходимо иметь количество уравнений $n+1$. Дополнительным уравнением будет задание суммарного расхода жидкости, т. е.

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q_0 . \quad (2.46)$$

Решая совместно эту систему уравнений, можно найти Q_i и h_τ .

Решения технических задач с разветвленными трубопроводами, с многими параллельными линиями весьма громоздки и требуют больших затрат времени.

Часто требуется знать, как перераспределится расход, если выключится тот или иной участок сети; что сделать с сетью, чтобы на некотором участке увеличить или уменьшить расход. Для быстрого решения таких задач применяется электрическое моделирование сетей.

Раздел 3. Возможные способы снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) [7]

К возможным способам снижения ГСТТ можно отнести: *модификацию параметров стенок труб* (уменьшение шероховатости и ослабление смачиваемости обтекаемой поверхности, уменьшение смоченного периметра и профилирование внутренних поверхностей, создание искусственной шероховатости и продольной кривизны стенок трубопроводов, использование податливых покрытий, подвижных стенок и изменение их температуры); *физическое влияние на поток жидкости* (направляющие подвижные и неподвижные поверхности, разделение транспортируемых сложных сред, управление пульсацией потока и пограничным слоем, утолщение вязкого подслоя, отсос и сдвиг пограничного слоя, ионный ветер); *изменение свойств жидкости* (создание дисперсных систем, золь и эмульсий, ослабление межмолекулярного взаимодействия и расщепление молекул высоковязких жидкостей).

Ниже подробно рассмотрены известные на сегодняшний день способы снижения ГСТТ, которые независимо и в сочетании с ГДАД могут быть использованы для создания высокоэффективных технологий и технических средств для решения проблем энергосбережения.

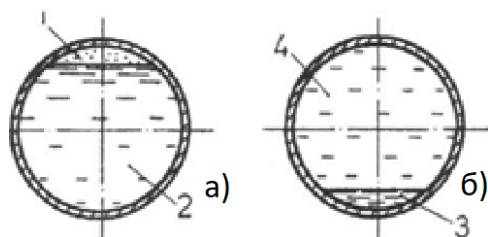
3.1. Модификация параметров стенок

Уменьшение шероховатости стенок труб достигается их шлифованием или же нанесением специальных покрытий [81].

Ослабление смачиваемости поверхностей достигают нанесением на них покрытий, которые увеличивают угол смачивания и уменьшают сцепление жидкости с твердой поверхностью [82]. В последние годы интенсивно исследуются сверх водонепроницаемые поверхности [83].

Уменьшения смоченного периметра при трубопроводном транспорте жидкостей достигают сокращением площади их контакта со стенками труб.

Газ над напорным потоком жидкости. В трубопровод, который транспортирует жидкость, вводят газ и обеспечивают условия расслоенного течения обеих сред (рис. 3.1,а). Увеличение расхода жидкости по этому методу достигает 20-30 % [84].



Водная подстилка. Более легкую высоковязкую жидкость, например нефть, перемещают в трубопроводе по слою воды (рис. 3.1,б).

Профилирование внутренних поверхностей трубопроводов. Оребрение обтекаемых поверхностей эффективно при турбулентных потоках. Самые распространенные продольные ребра или канавки (риблеты) треугольного разреза. Они подавляют вертикальные турбулентные пульсации и поперечные течения, снижая турбулентное трение (ТТ) на 8-16 % [85,86], а при Т-образных ребрах возможно пятикратное снижение ГСТТ [87]. Поперечные ребра в трубе способствуют росту интенсивности пульсаций скорости, а продольные, - уменьшают их. Поэтому поперечные ребра целесообразно применять для усиления теплообмена между потоком и стенкой [88].

Искусственная шероховатость поверхностей. Ее образуют выбором углублений (d-тип) [89], или наложением проволочных сеток (k-тип) [90]. В углублениях возникают стойкие вихревые образования, которые снижают частоту выбросов с уменьшенной скоростью в пристенной области турбулентного пограничного слоя. Эта тенденция усиливается с ростом числа Рейнольдса. К-тип шероховатости увеличивает вертикальные пульсационные скорости, не изменяя профиль горизонтальной пульсационной скорости [91]. Разрушаются структуры с масштабами, соизмеримыми с размером элемента шероховатости [90]. Углубления, которые демпфируют вихревые образования, уменьшают коэффициент сопротивления турбулентного потока до 35 % [92].

Продольная кривизна стенок трубопроводов. Существенно снижение ГСТТ в трубах периодического профиля с поочередными длинными диффузорными и короткими конфузорными участками [93,94]. (рис. 3.2) [95].

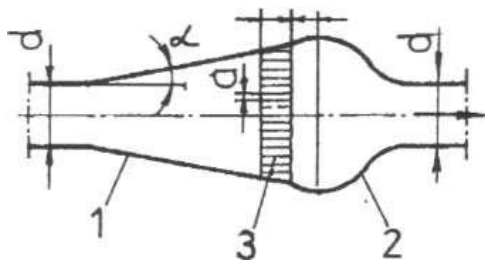


Рисунок 3.2 Трубопровод: 1 - диффузорный участок; 2-тоже самое, конфузорный; 3 - детурбулизатор ("хоней-комб") [95]

Податливые поверхности. **Активные** – это такие поверхности, которые с помощью привода генерируют колебания с заданными характеристиками. **Пассивные:** пассивные резонансные, которые колеблются при совпадении частот турбулентных пульсаций потока с одной из собственных частот стенки; *истинно податливые* поверхности осуществляют колебание под действием всего диапазона пульсаций давления [96,97].

Активные податливые поверхности с радиальным колеблющимся перемещением бывают локальными, к примеру, на вогнутой стенке в колене трубопровода (рис. 3.3) [98], или являются отрезком трубопровода с радиальным и осевым колебаниями стенок [99]. Прикладывая к трубопроводу с упругими стенками перемещаемое внешнее оттягивающее

усилие, приводят их в радиальное колеблющееся движение в виде волны, которая бежит вдоль трубопровода (рис. 3.4) [100], или же организуют стационарные волны, за счет чего достигают увеличения расхода. Значительно снижает гидравлическое сопротивление трения волновое движение стенок поперек потока [101].

Однако обнаружено, что податливые поверхности стареют и постепенно теряют свою эффективность [102].

Авторы изобретения [103] также показывают возможность уменьшения потерь на колене трубопровода.

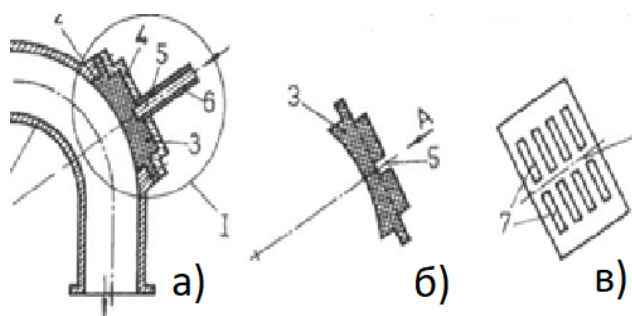


Рисунок 3.3 Колено трубопровода:
а - прорез по оси колена; б - узел I;
в - вид А на элемент 3:
1 - стенка; 2 - окно; 3 -
эластичный элемент; 4 - металлическая
заглушка; 5 - замкнутая полость; 6 -
трубка от источника давления; 7 - ребра-
выступы [98]

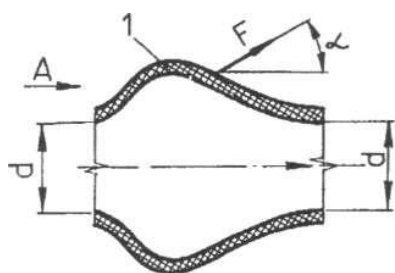


Рисунок 3.4 Упругий трубопровод:
1 - стенка трубопровода; F - перемещаемое
усилие; А - направление движения волны
[100]

Подвижные стенки. Активные стенки [104,105], которые движутся с помощью привода. С целью разрушения структурированных дисперсных систем отдельные участки трубопровода перемещают возвратно-поступательно вдоль потока, или же их вращают вокруг продольной оси [105]. Движение стенки поперек потока уменьшает силу сопротивления трения на 35 % [106].

Пассивные стенки, двигаясь под действием потока, например, вращаясь, предотвращают выпадение осадков из транспортируемых сред (рис. 3.5) [107].

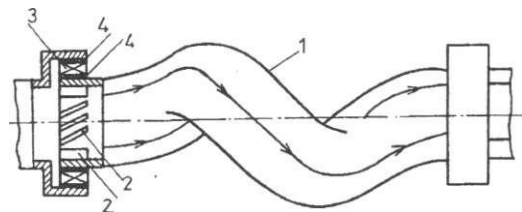


Рисунок 3.5. Устройство для
переформирования потока в трубопроводе: 1 -
согнутый участок трубопровода; 2 -
направляющие лопатки; 3 - подшипники
качения; 4 -уплотнение скольжения [107]

Изменение температуры стенок. Нагревание целесообразно при течениях жидкостей, поскольку вязкость последних уменьшается с ростом температуры. С целью устранения потерь тепла трубопровод изготавливают с двойными стенками [108].

Охлаждение стенок при течениях газов [96] обеспечивает уменьшение их вязкости. Возможно, искусственное и естественное охлаждение стенок трубопроводов.

Комбинированное влияние [83,95,98]. совмещает разные действия, направленные на изменение параметров стенок. Возможно совместное физическое действие, на стенку и на поток [95] (см. рис. 3.2), а в последней при этом вводят еще и добавки высокомолекулярных соединений [109], или создают между сверх водонепроницаемой поверхностью и потоком жидкости прослойку из тонкой воздушной пленки [83].

3.2. Физическое влияние на поток [110]

Направляющие поверхности в потоке применяются для формирования необходимого профиля скоростей и классифицируются на подвижные и неподвижные.

Подвижные направляющие поверхности. Активные поверхности приводятся в движение приводами [111]. Пассивные подвижные направляющие поверхности колеблются (рис. 3.6) [112] или вращаются вокруг своей оси под давлением потока, трансформируя профиль его скоростей к необходимой форме.

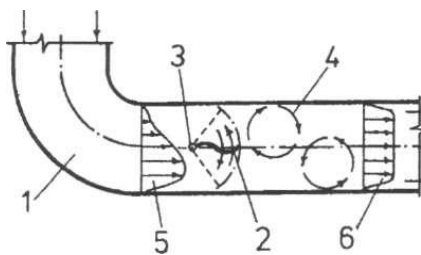


Рисунок 3.6 Устройство для выравнивания местных скоростей в потоке: 1 - канал; 2 - плоский гибкий элемент; 3 - ось; 4 - вихрь, сформированный элементом 2; 5 - исходный профиль скоростей; 6-тоже самое, требуемый [112]

Неподвижные направляющие поверхности локального действия, такие как, перемещаемые сетки и решетки применяют с целью управления интенсивностью турбулентности или же для выравнивания потоков перед расходомерами и энергетическими установками [113].

Неподвижными направляющими поверхностями уменьшают потери напора в коленах и внезапных расширениях труб (рис. 3.7) [115].

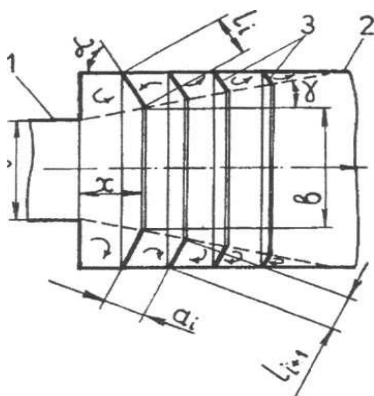


Рисунок 3.7 Расширение трубопровода:
1, 2-стенки труб; 3 – перегородки [114]

В работе [116] проведён анализ гидравлической эффективности противотурбулентных присадок и внутритрубных отложений в процессе эксплуатации нефтепроводов.

Распределение сложных сред. Потoki газожидкостных смесей выделяют газ, который собирается в верхней части трубопровода и движется быстрее чем жидкость, образуя на ее поверхности сначала гладкие, а в последствии шквальные волны. На это тратится значительная часть энергии потока [117]. В смесях с преобладанием газа возникают пробковые течения, резко снижая пропускную способность трубопровода [118].

Появление шквальных волн предотвращают разграничиванием фаз эластичной газопроницаемой диафрагмой, которая закрепляется вдоль трубопровода [119]. Пробковое течение устраняют закручиванием среды спиральными элементами для разделения на центральный газовый и периферийный жидкостный потоки [118].

Потоки эмульсий. В естественных водонефтяных эмульсиях, образованных из мицелл "вода в нефти", со стенками труб контактируют вязкие молекулы нефти. Снижают ГСТТ предотвращением образования эмульсии "вода в нефти", а частично обезвоженную нефть и отделенную воду перекачивают раздельно. Пропорционально суммарной длине сформированных водяных пробок уменьшаются потери энергии [120].

Управление пульсациями потока. При пульсационном течении полимерных растворов, например водного раствора ПАА, который является нелинейной вязкоупругой жидкостью [121] с вязкостью, которая зависит от частоты [122], расход увеличивается, пропорционально квадрату амплитуды пульсаций [123]. Однако анализ показывает, что энергетически невыгодно добиваться увеличения расхода жидкости созданием пульсаций давления [124]

Гашение пульсаций целесообразно применять в однородных жидкостях [125].

Усиление пульсаций эффективно для дисперсных сред. Гармонично изменяя напряжение в упруговязкой инерционной среде, получают, в зависимости от соотношения частотных и релаксационных характеристик, необходимые реологические свойства суспензии [126]. Волны пульсационных напряжений способствуют перенесению потоком частиц большого размера [127]. В ряде случаев создают продольные волновые колебания в гидросмеси пульсационной ее подачей в трубопровод [128].

Пристенный маловязкий слой (ПМС). Размещение между стенкой трубы и потоком вязкой жидкости слоя маловязкой среды заметно снижает ГСТ, поскольку поток скользит по слою со сниженной вязкостью. Образуют ПМС в пристенной области потока такими способами: а) введением менее вязкой жидкости; б) аэрированием ПМС микропузырьками [129]; в) нагреванием; г) охлаждением.

Например, охлажденная до температуры $T < 20$ °С нефть загустевает, выделяя воду, которая служит «маслом» [130]. Вдвое уменьшается сопротивление в турбулентном потоке заполнением турбулизированной зоны (ядра потока) вязкой жидкостью, а "вязкого подслоя" - менее вязкой жидкостью [131].

Управление пограничным слоем (ПС). Влияние вязкости при больших числах Рейнольдса дает о себе знать только в ПС, который непосредственно прилегает к стенке. Толщина ПС очень мала и обратно пропорциональна корню квадратному из числа Рейнольдса [97]. Внутренняя часть турбулентного ПС, глубина которой равна или меньше одной пятой части общей его толщины, полностью формируется стенкой и не испытывает влияния окружающих факторов. Внутренний турбулентный подслоя формирует структуру турбулентного ПС потока. Управление ПС с целью снижения ГСТТ по своей сути сводится к уменьшению части сугубо турбулентной структуры в потоке, который омывает стенку [97].

Утолщение вязкого подслоя. Значение местного напряжения трения τ обратно пропорциональное квадрату толщины вязкого подслоя δ : $\tau = \alpha \rho v^2 / \delta^2 \sim 1/\delta^2$. То же, имеет место для гидравлического коэффициента трения λ при установившемся движении в трубе: $\lambda \sim 1/\delta^2$. Незначительное утолщение вязкого подслоя вызывает существенное снижение ГСТТ. Вязкий подслоя эффективно утолщается введением в поток ГДАД [102, 132].

Отсасывание ПС через пористые стенки трубы устраняет его отрыв от последних [96], ослабляя пристенные касательные напряжения, и реламинизируя турбулентный ПС [133]. Отсасывают ПС насосами или же используют перепад давления, который образуется вдоль поверхности с уступом при ее обтекании жидкостью (рис. 3.8,а) [134].

Сдув ПС предотвращает его отрыв от обтекаемой поверхности [96].

Вдув под ПС задерживает турбулентный переход и предотвращает отрыв ламинарного ПС за местными возмущениями потока, в частности, при разрыве контура обтекаемой поверхности 1 (рис. 3.8,а). Благодаря перепаду давления жидкость отсасывается из ПС на пороге 3 уступа 1 и перетекает на участок поверхности после уступа, где вдувается под ламинарный слой, который отрывается от стенки 4 [134].

Высокоскоростное обтекание выпуклой стенки 1 колена потока сопровождается кавитационным разрушением поверхности 5 (рис. 3.8,б). Отводят его подачей в образованную отрывом полость 4 небольшого количества газа [135].

Наступление турбулентного отрыва в плоском диффузоре задерживают, периодически вдувая и отсасывая жидкость сквозь щель [136]. Вдувом или отсасыванием снижают сопротивление трения в трубе на 10 % [137]. Изменением скорости тангенциального или радиального вдува или отсасывания снижают ГСТТ в трубе на 13-23 % [138]. Иногда жидкость

впрыскивают в поток через одну стенку канала, а через вторую – отсасывают [139]. Резкое снижение ГСТТ вызывает вдув и горение газа в турбулентном ПС [140,141]. Большое количество струй, сформированных около стенки, утолщают турбулентный ПС в 5-6 раз [142].

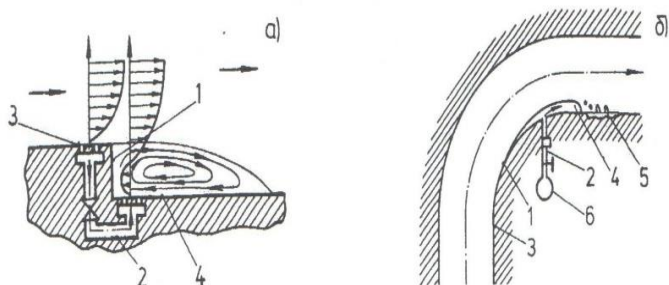


Рисунок 3.8. Схема вдува под ПС: а - при обтекании порога уступа; б - то же, для выпуклой стенки: 1 - обтекаемая поверхность; 2 - соединительный канал; 3 - участок высокого статического давления; 4 — то же, низкого; 5 - участок кавитации; 6 – емкость для газа

Ионный ветер используют для снижения ГСТТ при внешнем обтекании тел [85], а также для управления потоком жидкости в трубопроводе малого диаметра [143].

3.3. Изменение свойств транспортируемых жидкостей [144,145].

Образование дисперсных систем [145]. На нефтяных промыслах бывают случаи совместной отдачи подземным пластом нефти, газа и воды, или двух из них. В трубопроводе потоки двухфазных сред расслаиваются, порождая волны и пробковые течения. Движение обводненной нефти усложняется налипанием слоями ее молекул на стенках. Как следствие, резко возрастают транспортные затраты энергии. Одним из направлений предотвращения нежелательных явлений является образование из перемещаемых смесей дисперсных систем: золь; эмульсий; суспензий.

Золи. Перекачивание сухого природного газа оптимизируют формированием аэрозоля, вводя в поток жидкую фазу [146].

Эмульсии. Транспортировку вязких углеводородов улучшают образованием эмульсий типа "масло в воде", которые содержат до 80 % воды с эмульгатором [147]. Реологические свойства водонефтяных эмульсий "вода в масле" улучшают введением в них водного раствора полиакриламида (ПАА) концентрацией $5 \cdot 10^{-4}$ кг/кг [148]. Некоторые поверхностно-активные вещества (ПАВ) снижают ГСТТ лишь тогда, когда их водно-солевые растворы являются эмульсиями [149].

Суспензии целесообразно образовывать при гидротранспорте твердых сыпучих материалов. Стойкость двухфазных систем в потоке усиливают пульсационной транспортировкой [128] или дросселированием потока.

Суспензии, которые снижают ГСТТ, образуют из глинистых минералов, естественных и искусственных волокон [150].

Дискретные тела в потоке. Готовят их в виде твердых слитков преимущественно из высокопарафинистых нефтей и вводят в поток жидкой фазы. Транспортируют при температуре, ниже той, при которой они растапливаются [151].

Ослабление межмолекулярного взаимодействия осуществляют за счет [144]: а) нагревания жидкостей; б) охлаждения газов; в) растворения высоковязких тяжелых нефтей [152]; г) механического измельчения высокопарафинистых нефтей; д) кавитации [153]; е) звукового облучения структурированных жидкостей [154]; ж) пульсационного режима перемещения структурированных жидкостей; з) превращения фаз и др. [155].

Например, тяжелые масляные суспензии, разводят в специальных смесях, в состав которых входят ПАВ [152]. Кавитацию в трубопроводе образуют суживающими устройствами (рис. 3.9) [153]. При свертывании кавитационных пузырьков образуются микроструйки среды, скорость которых превышает 100 м/с , и ударные волны, с давлением до $5 \cdot 10^7 \text{ Па}$, которые разрушают межмолекулярные связи в жидкости, резко уменьшая ее вязкость.

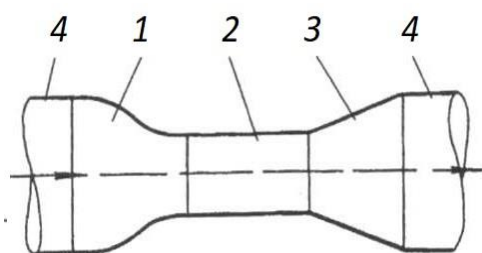


Рисунок 3.9. Устройство для уменьшения вязкости жидкости в потоке:

1 - плавное сужение; 2 - цилиндрический участок; 3 - безотрывный диффузор; 4 – трубопровод [153]

В работе [156] авторы предлагают для снижения трения в трубопроводах и шлангах использовать разработанное ими специальное устройство.

Звуковое облучение ослабляет межмолекулярное сцепление в потоках структурированных жидкостей [154] и применяется в противопожарных шлангах, а также в нефтепроводах [157]. Акустические колебания вводят в кольцевой ВП напорного потока (рис. 3.10) [114], а их частоту согласовывают с вязкостью жидкости. Акустическим облучением затягивают ламинарно-турбулентный переход [158].

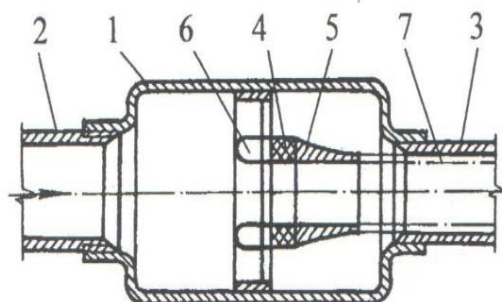


Рисунок 3.10. Устройство для снижения ГСТТ жидкостей в трубопроводе:

1 - корпус; 2, 3 - входной и выходной патрубки; 4 - кольцевой акустический излучатель; 5 - то же, волновод; 6 - обтекатель; 7 - облучаемый слой жидкости [114]

При интенсивном перемешивании эмульсии в присутствии ПАВ, изначальная эмульсия типа "вода в нефти" переходит в легкотекучую эмульсию - "нефть в воде", вязкость которой в 100...1000 раз меньше, чем вязкость исходной сырой нефти [159].

С целью снижения ГСТТ, начиная с поднимаемых труб скважин, целесообразно вводить ПАВ в межтрубное пространство скважин [160].

Расщепление молекул [144]. Поток нефти в скважине или в трубопроводе обрабатывают монохроматическим электромагнитным лазерным излучением, разрывая этим связи между атомами молекул углеводородов и вызывая необратимое снижение вязкости жидкости [161].

Управление свойствами перекачиваемых сред направлено на понижение вязкости жидкостей. К преимуществам этих способов снижения ГСТТ относятся: возможность реализации на любом этапе эксплуатации трубопроводов; возможность длительного, периодического или кратковременного применения; отсутствие необходимости внесения существенных конструктивных изменений в действующие трубопроводы; технический эффект действия ГДАД распространяется на значительные расстояния вдоль потока.

Половина из свыше двух сотен обнаруженных и проанализированных изобретений по снижению ГСТТ приходится на управление свойствами жидкостей, включая введение в поток гидродинамически-активных добавок, что свидетельствует об особой актуальности этого направления.

3.4. Влияние гидродинамически-активных добавок (ГДАД) на интегральные параметры потоков

Энергосбережение является одной из основных проблем современности. Нет сомнения, что в будущем эта проблема будет усиливаться. Удачное решение проблемы снижения ГСТТ в магистральных газопроводах, нефтепроводах, продуктопроводах и водопроводах позволит значительно сэкономить государственные средства. Одним из путей решения этой важной задачи является ввод в поток жидкости гидродинамически активных добавок [162].

Гидродинамически-активные добавки (ГДАД) находят практическое применение в самых различных отраслях промышленности [40,163]. С помощью полимерных добавок улучшают работу противопожарной техники [48,164], уменьшают потери энергии в нефтепроводах [116,165], нефтепродуктопроводах (дизельное топливо, бензин) [166]. При этом наличие полимерных добавок в горючем не влияет на эксплуатационные характеристики автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями [167]. ГДАД снижают ГСТТ в теплосетях, системах холодоснабжения [164], орошения [168], канализации [169] и гидротранспорте [164,169]. В теплотрассах полимерными добавками уменьшают потери тепловой

энергии в окружающую среду, причем значительно, чем снижают ГСТТ. Это обусловлено понижением массообмена между слоями жидкости в потоке за счет ламинаризации пристенной области [170]. С помощью полимерных добавок ослабляют кавитацию [169], режут высокоскоростными струями воды различные материалы, включая металлы [164,169], понижают артериальное давление [171,172], уменьшают уровень гидроакустических шумов военных судов [164,173] и жидкостей в их бортовых системах, повышают быстроходность судов и торпед [162]. Полимерными составами моделируют течение синовиальной жидкости в суставах человека. Обнаружено, что очищенный полиакриламид (ПАА) не токсичен [174]. Поэтому его применяют в процессах флокуляции и коагуляции при очистке питьевой воды [175].

В процессе применения ГДАД, совместно с другими способами снижения ГСТТ, получают результат, который равен сумме эффектов от воздействия каждого из этих методов [176]. Совмещают работу полимеров с покрытием стенок труб веществами, которые уменьшают смачиваемость [82], с продольным профилированием [177], с податливыми стенками труб [178]. Сочетают вдув воздуха через пористые поверхности с впрыском полимерных растворов в пограничный слой потока. Аэрирование потоков с полимерными добавками увеличивает их эффективность на 15-30% [179]. Добавками ПАВ уменьшают затраты энергии на создание вибрационного поля, которое разрушает структуру высококонцентрированных суспензий, с целью снижения их гидравлического сопротивления [180].

Высокомолекулярные соединения. Синтетические полимеры. Для снижения ГСТТ, при перекачивании воды и жидких углеводов, широко применяются карбоцепочные полимеры. Это название они получили, потому что их основная цепь макромолекулы состоит из углеводов [174].

За рубежом получили широкое применение полиэтиленоксиды (ПЭО), синтезированы высокомолекулярные соединения, которые содержат ферромагнитные элементы, периодически вшитые по длине макромолекулы. Действуя на эти элементы магнитным полем, можно управлять турбулентным пограничным слоем [181].

Экономически эффективны полимерные добавки при их комплексном использовании. По данным И. Порайко [182], в нефтепроводах они создают такие положительные эффекты: а) увеличивают пропускную способность; б) предотвращают отложение парафинов на стенках труб; в) уменьшают содержание солей в нефти.

К большому сожалению высокомолекулярные соединения подвергаются механическому, термическому и химическому разрушению, а их слабоконцентрированные растворы - еще и старению. Однако следует отметить, что высококонцентрированные растворы полимеров практически не деградируют. Механическая деструкция полимерных растворов

происходит при больших сдвиговых напряжениях. При этом макромолекулы разрываются пополам. Разорванные связи в макромолекулах не восстанавливаются. А. Б. Ступин установил аналогию этого процесса с явлением полураспада радиоактивных ядер [183].

Меры предотвращения деструкции и деградации полимерных растворов. В растворы вводят стабилизаторы, сшивают макромолекулы, образуют суспензии и эмульсии, отстаивают растворы, синтезируют устойчивые к деструкции полимеры и полимеры с координационными связями, которые обеспечивают восстановление макромолекул после разрыва, применяют в комплексе с другими добавками и др.

Синтезированы полимеры для применения в системах горячего водоснабжения с температурой воды до 180 °С [184] и в холодильных контурах [40,164].

Биополимеры. Гуаровая смола (ГС) – это сложный полисахарид, который получают из тропического растения *Cyamopsi tetragonolagus*. Применяется ГС в качестве приправы к пище и загустителя жидкостей. ГС относительно дешевая и имеет прочные молекулы, которые устойчивы к деформации в потоках с большими сдвиговыми напряжениями [3].

Торф - многокомпонентная полукolloидная высокомолекулярная система, сапропели - донные отложения пресноводных озер. При массовой концентрации сапропеля в водном потоке, равной 1 %, достигается снижение ГСТТ на 68 %. Торфа для этого необходимо 6-9 %. Оба эти продукта устойчивы к механической деструкции и пригодны для снижения ГСТТ в циркуляционных системах [185].

Снижают ГСТТ льняная мука [3], мелкие водоросли, пыльца растений [178], яичный белок, слизь, которую выделяют рыбы. Однако, для получения одинакового эффекта концентрация природного полимера, как правило, должна быть на порядок выше, чем у синтетического [163].

Минералы. Асбест, например, хризолит, который известен как горный лен, по прочности, при растяжении вдоль волокон, превосходит сталь. Такие волокна эластичны, устойчивы к воздействию кислот и щелочей.

Мицеллообразующие поверхностно-активные вещества (МПАВ) [186,187]. Молекулы ПАВ накапливаются в поверхностном слое, и тем самым снижают поверхностное натяжение растворителя. ПАВ выталкиваются на поверхность, где их концентрация в 104 раза больше, чем в жидкости. Поверхностно-активными веществами в отношении воды являются жирные кислоты с большим углеводородным радикалом, соли этих кислот (мыла), сульфокислоты и их соли, спирты, амины. Наименьшее значение поверхностного натяжения в водном растворе ПАВ достигает $25 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², почти, как у углеводов [188].

Способ снижения ГСТТ добавками ПАВ был заявлен И.Т. Эльпериным в 1954 г. [189]. ПАВ, которые образуются в растворе мицеллярные системы, называют коллоидными или мицеллообразующими

ПАВ (МПАВ). Гидродинамическое сопротивление снижают только полноценные (коллоидные) ПАВ. При концентрации этих МПАВ в растворе, равной или большей второй критической концентрации ККМ₂ образуются мицеллы несферической формы, мицеллярный вес которых сопоставим с молекулярным весом полимеров, которые снижают ГСТТ [9]. Увеличение концентрации в истинном водном растворе МПАВ вызывает на первой стадии образование в системе из отдельных молекул ПАВ сферических мицелл Гартли. При достижении ККМ₂ в растворе образуются цилиндрические и пластинчатые мицеллы, состоящие из двух слоев молекул ПАВ, повернутых друг к другу углеводородными цепями, а ионогенными группами наружу. Эти агрегаты называют мицеллами Мак-Бэна и напоминают по своему строению двумерный кристалл, который может иметь неограниченно большие размеры в двух направлениях. В растворе они образуют гель [188]. В растворе метаупона (одного из наиболее эффективных МПАВ), при наличии электролита, образуются различные мицеллярные структуры, которые характеризуются не менее чем четырьмя ККМ. Снижение ГСТТ в растворе метаупона появляется только после ККМ₂ [190]. Предполагается, что при этом возникают нитевидные мицеллы. Молекулярная масса молекулы ПАВ равна 200...500, а мицеллярный вес мицелл - $10^6...10^8$ [188].

Большинство синтетических МПАВ снижают гидродинамическое сопротивление лишь при наличии электролитов [61], например, хлористого натрия. Оптимальные значения его концентрации в водных растворах некоторых МПАВ приведены в табл. 3.1 [191].

Таблица 3.1

Оптимальные концентрации некоторых МПАВ и хлористого натрия в водных растворах для снижения ГСТТ.

МПАВ	Массовая концентрация в растворе, кг/кг		
	МПАВ в различных средах		Хлористый натрий
	Кислая, pH=2	Нейтральная, pH=7	
Мыло МРТУ 18/233-68		$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
Ditalan OTS		10^{-2}	$(3...5) \cdot 10^{-2}$
Metaupon	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$(7...8) \cdot 10^{-2}$

Водные растворы диталана OTS, в отличие от метаупона, подвергаются деградации. Ввод гидрохинона в растворы этого МПАВ останавливает процесс старения. Мыло МРТУ 18/233-68 снижает ГСТТ и без электролита. Однако, без него, для эффективного снижения ГСТТ, содержание мыла в водном растворе должно быть вдвое больше [191].

Следует отметить, что ПАВ образуют мицеллы и в углеводородных растворах.

Растворимость ионогенных ПАВ постепенно увеличивается с повышением температуры до значения, которое известно как точка Крафта.

После этой точки в истинном растворе появляется мицелярная фаза вещества и резко возрастает растворимость ПАВ, которая продолжает увеличиваться с ростом температуры. Точка Крафта определяется пересечением кривых зависимостей растворимости и KKM_1 от температуры. Растворимость длинноцепочных ПАВ возрастает при наличии в растворе короткоцепочных ПАВ, благодаря образованию смешанных мицелл.

МПАВ эффективны в водных потоках замкнутых трубопроводных систем, поскольку обладают обратимой механической деструкцией. Для снижения ГСТТ в многофазных водонефтяных эмульсиях применяют неионогенные ПАВ типа дисолвана в количестве $(4...6) \cdot 10^{-5}$ кг/кг и создают турбулентный режим течения, который удовлетворяет условию:

$$Re_3 \cdot We^{1,2} \cdot \frac{\rho_\phi}{\rho_0} > 0,46 ,$$

где $Re_3 = V \cdot d \cdot \rho_3 / \mu_3$ – число Рейнольдса для эмульсии, $We = \sigma / \rho_3 V^2 D$ – число Вебера, V – средняя скорость потока, м/с; d – диаметр трубы; ρ_ϕ , ρ_c и ρ_3 – плотности дисперсной фазы, дисперсионной среды и эмульсии, кг/м³; μ_3 – динамическая вязкость эмульсии, Па·с; σ – межфазное натяжение, Н/м [192].

Дисолван в данном случае служит еще и деэмульгатором [192]. ПАВ – деэмульгаторы, предотвращают образование водотопливных эмульсий в процессе транспортировки жидких топлив [193] и в десятки раз снижают вязкость нефти, приближая ее к вязкости воды [194].

Отвердевшие частицы транспортируемой жидкости. Замороженные анизотрично сформированные частицы. Преимущество ГДАД, сформированных из транспортируемой жидкости, заключается в том, что в поток не вносятся чужеродные тела, а также в относительной простоте и дешевизне их получения.

При совместной транспортировке природного газа и нефти последнюю продавливают через фильтры в емкость с переохлажденным сжиженным газом и разрезают замороженные нефтяные нити на частицы длиной равной 0,5...2,0 мм. Удлинения их $\bar{l} = l/d > 20...70$, а объемная концентрация в суспензии - 0,02...0,08 %. При перекачивании такой среды поддерживают температуру, необходимую для пребывания природного газа в жидком состоянии [195].

Кристаллогидраты перекачиваемой жидкости характеризуются стойкостью к термической и механической деструкции. При перекачивании сжиженного природного газа кристаллогидраты получают подачей последнего в кристаллизатор под давлением $5 \cdot 10^6$ Па, а навстречу ему разбрызгивают холодную воду. В газоконверторе водную суспензию кристаллогидратов продавливают сквозь фильтры с отверстиями $d=50...100$ мкм и режут на частицы с $\bar{l}=10...70$. Необходимая концентрация

этих частиц в потоке равна $0,02...0,08$ %. В конце трубопровода, после перетопки, кристаллогидраты снова превращаются в газ и воду [196].

Асфальтены и нефтяные смолы. Введение асфальтенов или нефтяных смол в трубопроводный поток нефти или керосина в количестве $0,5...1,0$ % уменьшает гидравлическое сопротивление трения на 45 %. Асфальтены и смолы практически не подвергаются деградации и деструкции. Вероятно, что их действие на пристенную турбулентность такое же, как и МПАВ [197].

Волокна. Природные и искусственные волокна даже при значительной их удлинённости являются стойкими к деструкции. Исследование течений водных суспензий древесных волокон и древесных щепок были вызваны потребностями целлюлозно-бумажного производства. При гидротранспорте последних не обнаружено уменьшения гидравлического сопротивления трения [198]. Течение водных суспензий древесных волокон с массовой концентрацией $C=0,21...1,17$ % в трубах сопровождается снижением ГСТТ. Считается, что древесные волокна образуют хлопья, которые гасят турбулентность в ядре потока. Ослабление влияния волокон на турбулентность при большой скорости течения связывается с уменьшением размеров хлопьев [197] или клубков волокон [199], которые разрушаются в турбулентном потоке. При фиксированном числе Рейнольдса гидродинамическая эффективность древесных волокон растёт с увеличением диаметра трубы. В шероховатых трубах древесные волокна могут увеличивать сопротивление [197]. Гидродинамические характеристики потока суспензии функционально зависят от степени измельчённости волокон [199]. Эффективность действия твердых волокон прямо пропорциональна их удлинению \bar{l} и концентрации C в потоке [200].

Асбестовые волокна при $d=10^{-2}...10^{-1}$ мкм имеют $\bar{l}=10^4$. При концентрациях асбестовых волокон в суспензиях $10^{-4}...10^{-3}$ кг/кг для $Re=2\cdot 10^4$ получено снижение ГСТТ в трубах на $40...60$ %. Асбестовые добавки в шероховатой трубе эффективнее, чем в гладкой, однако с ростом числа Рейнольдса их действие уменьшается [197].

Устойчивыми к деструкции являются нейлоновые волокна и волокна, нарезанные из нитей искусственного шелка с $\bar{l}=50$. Для снижения ГСТТ необходима их массовая концентрация в суспензии $C\approx 4$ %. В трубопроводном потоке из волокон образуются хлопья, размеры которых растут с удалением от стенки.

Другие ГДАД. Устойчивы к деградации и деструкции при длительном применении суспензии которые приготавливают из: глинистых минералов (монтмориллонит, илит, каолинит, палигорскит); природных волокон (асбестовых, древесных, шелковых, хлопчатобумажных); искусственных волокон (базальтовых, стеклянных, графитовых и др.) [145].

Глинистые фракции снижают ГСТТ в водном потоке, в зависимости от концентрации взвеси и числа Рейнольдса. Уменьшение сопротивления

связывается с их асимметричностью и способностью образовывать агломераты, которые меняют свою форму в турбулентном потоке [197].

Комплекс добавок. Для предотвращения механической деструкции макромолекул растворимых полимеров их вводят в поток жидкости вместе с нерастворимыми волокнами, которые хорошо диспергированы в ней и имеют $l/d > 100$, а плотность - равную плотности транспортируемой жидкости. Применяют органические, минеральные или искусственные (нейлоновые $d < 20$ мкм) волокна [145,197]. Последние обрабатывают концентрированным раствором полимера или ПАВ. При этом массовая концентрация упругих нитей $C = 5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-2}$, а полимеров и ПАВ - $10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ кг/кг. После использования выделяют нити из жидкости фильтрацией.

Устойчивость к деструкции дорогостоящих полимеров повышают добавками дешевых и менее эффективных, но прочных полимеров и волокон [201]. Волокна и полимеры совместно снижают ГСТТ на 90...95 % [197]. Полимер-асбестовые композиции эффективны при гидротранспорте сыпучих материалов [202].

В циркуляционных системах гидроустановок, контур которых включает открытый водоем, экономичными являются комплексы синтетических и природных полимеров. Для этого в водохранилище вносят одноклеточные пресноводные микроорганизмы, которые в результате своей жизнедеятельности выделяют в воду гидродинамически-активные вещества, оптимальная доза которых должна лежать в пределах $5 \cdot 10^{-6} \dots 8 \cdot 10^{-4}$ кг/кг [203].

Раздел 4. Эффект снижения ГСТТ добавками высокомолекулярных полимеров (ВМП)

4.1. Физическая суть эффекта Томса

4.1.1. Математические модели течений ньютоновских жидкостей в трубах

Жидкости и газы, являясь вязкими средами, при течениях в трубах прилипают к стенкам. При этом их скорость на стенках равна нулю. В пределах ПС она достигает некоторого конечного значения, порождая этим силы трения. Величину касательного напряжения сил трения τ_0 в точке поверхности, которую обтекает поток жидкости, рассчитывают по формуле:

$$\tau_0 = \frac{\rho(v + v_T)d\bar{u}}{dy}, \quad (4.1)$$

где v и v_T – кинематические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости; $d\bar{u}/dy = \dot{\gamma}$ – скорость сдвига [97]. Для ламинарного течения величина v определяется физическими свойствами среды, в то время как v_T находится в сложной зависимости от характера течения. При этом величина v_T может на 2-3 порядка превышать величину молекулярной вязкости v .

Согласно двухслойной модели Л.Прандтля турбулентный поток разделяется на вязкий подслой (ВП) и турбулентное ядро течения. На рис. 4.1 [204] приведен профиль скоростей, который соответствует этой модели, его линейный участок для ВП:

$$\frac{u}{v_*} = \frac{v_* y}{\vartheta}, \quad (4.2)$$

представленный кривой 1, сопрягается с логарифмической частью для турбулентного ядра [205]:

$$\frac{u}{v_*} = \frac{l}{k} \ln \frac{v_* y}{\vartheta} + 5.1, \quad (4.3)$$

которые пересекаются в точке С, принадлежащей границе ВП [204]. В формулах (4.2) и (4.3): v_* – динамическая скорость, $v_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$; k – постоянная Кармана, определяется экспериментально [205], $k=0.4$; ϑ – кинематическая вязкость; τ_0 – напряжение трения на стенке; ρ – плотность жидкости; y – расстояние от стенки трубы до рассматриваемой точки потока, $y=R-r$; где R – радиус трубы; r – расстояние от оси трубы до рассматриваемой точки.

Закон, описываемый уравнением (4.3), можно использовать для гладких труб [206]. При десятичной основе логарифма его представляют в виде двучлена:

$$\frac{u}{v_*} = A \lg \frac{v_* y}{\nu} + B, \quad (4.4)$$

где A и B – коэффициенты, которые, согласно экспериментальным исследованиям Никурадзе, для ньютоновских жидкостей равны: $A = 5,75$; $B = 5,50$.

Измерения показали, что сопряжение профилей скоростей 1 и 2 является плавным. Для устранения этого недостатка двухслойной модели Л.Прандтля Т.Карман предложил ввести в неё промежуточный слой (переходную область) между ВП и турбулентным ядром. В пределах этого промежуточного слоя u и u_T имеют один и тот же порядок. По этой причине он не охватывается теорией ВП, в которой пренебрегают турбулентной вязкостью, и полуэмпирической теорией турбулентного ядра, в которой берут во внимание только турбулентные напряжения [204]. Промежуточный слой иногда называют буферным поясом. На рис. 4.1 он представлен кривой 3, которая лежит в интервале от $\xi = v_* y / \nu \approx 5$ до $\xi \approx 30$ [205], включая часть вязкого подслоя, и часть турбулентного ядра из двухслойной модели Л.Прандтля.

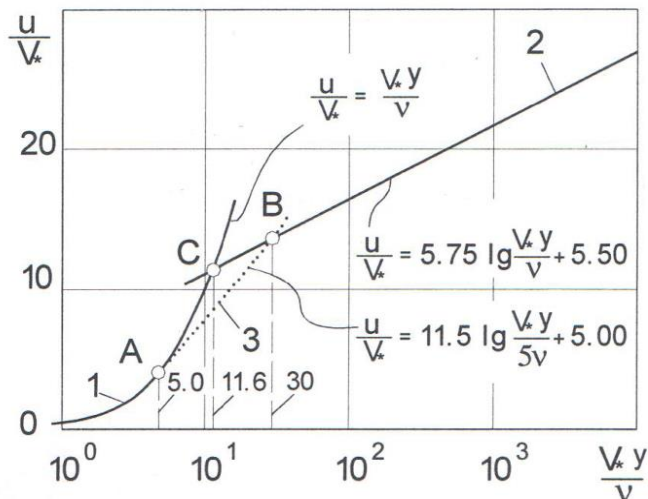


Рисунок 4.1 Модели турбулентного течения жидкости возле гладкой стенки: 1,2 двухслойная модель Л.Прандтля; 1,2,3 — тоже самое, трехслойная модель Т. Кармана; 1 — вязкий подслой; 2 — турбулентное ядро, 3 — переходная область; A,B,C, - границы участков [205,207]

Резкой границы между ВП и остальным потоком конечно же нет, а понятие о вязком подслое имеет лишь качественный характер и движение жидкости в нем турбулентное. Пульсационное движение в вязком подслое проявляет своеобразные особенности, которые не имеют еще адекватной интерпретации [205].

В пределах буферного пояса турбулентного ПС под влиянием выступов шероховатости образуются отдельные вихри, которые проникают в безвихревое турбулентное ядро потока [207]. Эти вихри, вероятно, являются основной причиной перемешивания в турбулентном ядре. От их интенсивности и стойкости зависит степень турбулизации потока, при наивысшем уровне которой сопротивления пропорциональны скорости во второй степени.

Зависимость гидравлического коэффициента трения λ от числа Рейнольдса при турбулентном течении жидкости в трубе диаметром d получается из формулы (4.3) в неявном виде [205]:

$$\frac{l}{\sqrt{\lambda}} = 0,88 \cdot \ln(Re\sqrt{\lambda}) - 0,85 , \quad (4.5)$$

или в десятичных логарифмах

$$\frac{l}{\sqrt{\lambda}} = 2,0 \cdot \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 0,80 , \quad (4.6)$$

Для напорного течения в круглой трубе диаметром $d=2R$ касательные напряжения в потоке определяются по формуле

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{R}\right), y \leq R , \quad (4.7)$$

Поэтому, согласно (4.7), напряжение трения на оси трубы ($y=R$) равно нулю. При $y \ll R$, т.е. возле стенки, $\tau_{(y)} = \tau_0 = const$, а профиль средней скорости определяется формулой (4.3) [206].

Толщина вязкого подслоя δ составляет доли миллиметра. Для напорных потоков при течениях ньютоновских жидкостей

$$\delta = \frac{\alpha v}{\sqrt{g Ri}} , \quad (4.8)$$

где α – универсальная безразмерная постоянная, $\alpha=11,6$ [208]; R – гидравлический радиус; i – гидравлический наклон, $i=h/l$. Согласно (4.8) установившегося движения в трубе

$$\lambda = \frac{8\alpha^2 v^2}{v^2 \delta^2} \sim \frac{1}{\delta^2} . \quad (4.9)$$

Таким образом, даже незначительное утолщение ВП приводит к существенному снижению турбулентного трения. При внешнем обтекании тел существует два варианта уменьшить часть турбулентного участка: смещать вдоль потока точку начала турбулентного ПС или увеличивать толщину δ вязкого подслоя [96].

Для течений в трубах существует только один путь уменьшения гидродинамического сопротивления трения — это увеличение толщины ВП [96], к этому сводятся все способы снижения турбулентного трения, которые приведены в разделе 3.

4.1.2. Потоки жидкостей с ГДАД

Потоки жидкостей с гидродинамически-активными добавками представляют собой комплекс физических процессов, которые интегрально проявляются в снижении турбулентного трения.

Для теоретического объяснения сути этого явления учёными всего мира предложено около тридцати гипотез [163]. Однако точного решения задачи на сегодня не получено. Ни одна из гипотез не стала общепризнанной [96]. В зависимости от подхода к сути явления, все известные гипотезы условно разделяют на структурные и феноменологические [209].

Структурный подход, в котором осреднением действия отдельных частиц определяются макроскопические особенности потока. Он включает две группы гипотез, которые принципиально отличаются размерами ГДАД. В работах первой группы гипотез допускается, что это отдельные макромолекулы с линейным размером 10^{-3} мм [132]. Согласно гипотезам второй группы, полимеры проявляют гидродинамическую эффективность когда их молекулы объединяются в ассоциаты с длинами соизмеримыми с диссипативным масштабом турбулентности, т.е. порядка $0.1...1.0$ мм [210,211]. Сторонники больших частиц считают, что последние просто гасят высокочастотные пульсации и вихри или уменьшают возмущения, которые образуются в пристенной области потока и соизмеримы с ассоциатами [210,212]. Одни предполагают, что агрегаты должны иметь асимметричную форму [210,212], другие – не считают это необходимым.

Гипотезы структурного подхода не дают однозначных ответов на ряд принципиальных вопросов: Эффективны отдельные макромолекулы или их ассоциаты? Главную роль определяет упругая деформация или дополнительная вязкость? ГДАД ослабляют порождение возмущений в пристенной области течения или передачу турбулентной энергии вследствие увеличения её диссипации или уменьшения частоты пульсаций?

Феноменологический (макроскопический) подход основан на анализе турбулентного течения сплошной вязкоупругой среды. В реологии для описания таких течений предложен ряд моделей, каждая из которых имеет свои преимущества. В этих моделях дополнительно учитывается время релаксации напряжений, поперечная вязкость, возрастание напряжений при растяжении, анизотропия напряжений, действие нормальных напряжений. Отдельные особенности вязкоупругих жидкостей положены в основу гипотез макроскопического подхода.

В работе [213] допускается, что макромолекулы, упаковываясь параллельно, образуют фибрилы (пачки) из которых в растворах появляется распространяющаяся на весь объём сеточная структура при концентрациях полимеров в растворах C , которые удовлетворяют условию $C[\mu]_s \approx 0.01$, а может и меньшим. Здесь $[\mu]_s$ – характеристическая вязкость. Флуктуационная сетка фибрил приводит к упругим свойствам растворов. Основной характеристикой вязкоупругой жидкости является характерное время θ , а удобным безразмерным параметром – число Вайсенбёрга:

$$We = \frac{\theta v}{d}, \quad (4.10)$$

где v и d – характерные скорость и линейный размер потока.

Существует зависимость между временным масштабом турбулентного потока и временем релаксации макромолекул. А. Фейбула, Дж. Ламли и В. Тейлор [210] впервые предложили критерий для определения начала снижения сопротивления, который основан на этом взаимодействии. В качестве временного масштаба турбулентного течения ими взята величина

$$\vartheta = \frac{v}{v_*^2}, \quad (4.11)$$

где v – кинематическая вязкость раствора; v_* – динамическая скорость.

В рамках феноменологического подхода покамест не удается учитывать все свойства вязкоупругой жидкости или выделить те из них, которые бы однозначно приводили к эффекту снижению ГСТТ.

Однако объединяющим звеном обоих подходов является анизотропия динамической вязкости потоков жидкости с ГДАД и предельное граничное время релаксации.

4.1.3. Математические модели эффекта

Считается, что поглощение высокочастотных пульсаций связано главным образом с аккумуляцией энергии в макромолекулах растворенного полимера. Энергия накапливается в отдельной макромолекуле при ее упругой деформации, и вероятно, диссипирует в тепло или излучается волнами сдвига. Вязкость $\mu = \nu\rho$ является мерой диссипации энергии, а характеристическая вязкость $[\mu]$ определяет меру аккумуляции энергии в макромолекулах [214]. В результате большого градиента скоростей ($du/dy > 10^2$) в вязком подслое и буферной зоне удлинённые частички ориентируются большими осями вдоль оси потока x . По этой причине поглощение турбулентной энергии является неравномерным по различным направлениям. Соответственно величины вязкости движущейся жидкости с ГДАД отличаются вдоль разных осей: по потоку – μ_x ; перпендикулярно к нему – μ_y . Для объяснения явления снижения ГСТТ простейшими удлинёнными частицами введено понятие коэффициента анизотропии динамической вязкости [132]:

$$k_a = \frac{\mu_y}{\mu_x}, \quad (4.12)$$

Для удлинённых осесимметричных частиц, при небольших градиентах скорости, $k_a = 1$, при больших — всегда $k_a > 1$, т.к. с ростом критерия Рейнольдса угол φ преимущественной ориентации анизометрических частиц в потоке (относительно его продольной оси x) уменьшается, приближаясь к $\varphi \approx 0$. В неподвижной жидкости, а также в ядре потока, где $\varphi = \pi/4$, вязкость имеет максимальное значение, а при $\varphi = 0$ –

наименьшее [132]. Поэтому, вязкость сред с ГДАД уменьшается с увеличением du/dy . Динамический коэффициент вязкости движущейся системы определяется по формуле:

$$\mu = \mu_0(1 + C[\mu]) , \quad (4.13)$$

где μ_0 – вязкость растворителя; $[\mu]$ – характеристическая вязкость, которая зависит от градиента скорости, т.е. является функцией расстояния от стенки [215].

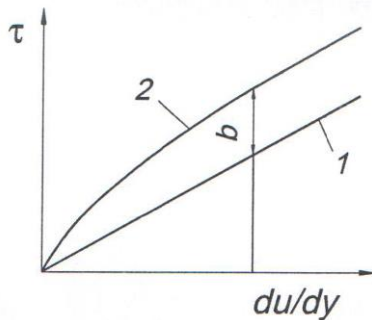


Рисунок 4.2 Зависимость напряжений от градиента осреднённой скорости в растворе полимера:

1-ньютоновская жидкость (растворитель);
2-раствор; b – неньютоновское приращение;
 $\tau = \mu_X \cdot du/dy + b$ [215]

В связи с тем, что поглощение энергии в продольном вдоль оси x и в поперечном у направлениях пропорционально $\sin^2 \varphi$ и $\cos^2 \varphi$, соответственно, то для какого-либо du/dy коэффициент k_a можно рассчитать, определяя μ_X и μ_Y по формуле (4.15):

$$\mu_X = \mu_0(1 + C[\mu] \sin^2 \varphi); \quad \mu_Y = \mu_0(1 + C[\mu] \cos^2 \varphi) . \quad (4.14)$$

При больших Re , когда $\varphi \approx 0$ [214],

$$k_a = \mu_Y / \mu_X = 1 + C[\mu] , \quad (4.15)$$

где $[\mu]$ – характеристическая вязкость по теории Рауза:

$$[\mu] = 0.608[\mu]_0 \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_2} \sum_{p=1}^n \frac{\omega \theta_1}{p^2 + \omega^2 \theta_1^2} . \quad (4.16)$$

Здесь $[\mu]_0$ – характеристическая вязкость растворителя для установившегося течения при малых градиентах средней скорости; $\omega, \omega_1, \dots, \omega_2$ – диапазон частот внешнего возмущающего поля; p – число сегментов в цепочке молекулы полимера, $p=1, \dots, n$; θ_1 – первое (предельное) время релаксации, которое отвечает самому медленному перемещению сегментов макромолекулы:

$$\theta_1 = \frac{6}{\pi^2} \cdot \frac{M}{R} \mu_0 [\mu]_0 , \quad (4.17)$$

где M – молекулярная масса полимера; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; μ_0 – вязкость растворителя.

Если частота турбулентных возмущений меньше от собственных частот макромолекулы $\omega < p\theta_1^{-1}$, то, по мнению И.Л. Повха и А.Б. Ступина

[214], не происходит заметного поглощения энергии этих возмущений и $k_a=1$. Макромолекулы взаимодействуют только с малыми турбулентными вихрями, демпфируя пульсации в тонком слое около стенки, которая включает вязкий подслой и переходную область. При удалении от стенки масштаб диссипативных вихрей растет и на некотором расстоянии взаимодействие макромолекул с вихрями прекращается. При этом $\omega < p\theta_1^{-1}$, что согласуется с экспериментальными результатами. При течении полимерных растворов интенсивность турбулентных пульсаций в ядре потока такая же, как и в чистом растворителе, а профиль средней скорости остается логарифмическим.

Исходя из того, что при течениях растворителя и раствора ГДАД отличаются только две вязкости, Г. Ф. Кобец [132] получил выражение, для вычисления толщины вязкого подслоя в потоках жидкостей с ГДАД

$$\delta_s = \alpha_s \frac{v_s}{\sqrt{\tau_{os}/\rho_s}} \frac{v_Y}{v_X}, \quad (4.18)$$

где индексами s обозначенные параметры, которые касаются жидкости с ГДАД.

Г.Ф.Кобец допускает, что $\alpha_s=\alpha$, а также то, что при больших числах Рейнольдса, когда $du/dy \rightarrow \infty$, то и $\mu_X \rightarrow \mu^*$, $v_X \rightarrow v^*$ и $\tau^* = \tau^*$, поскольку

$$\tau^* = \mu_X \frac{du}{dy} + b, \quad (4.19)$$

а при $du/dy \rightarrow \infty$, слагаемое $b/\mu_X(du/dy) \rightarrow 0$, где b – неньютоновское приращение, которое является функцией градиента скорости.

Учитывая изложенное из (4.19) получено

$$\frac{\delta_s}{\delta} \approx \frac{\alpha_s v_Y}{\alpha v} \approx \frac{\mu_Y}{\mu_X} = k_a, \quad (4.20)$$

то есть толщина ВП в растворе полимера увеличивается по сравнению с растворителем в k_a раз.

Таким образом показана связь наличия в турбулентном потоке раствора с ГДАД утолщения вязкого подслоя и снижения ГСТТ, согласно условий (4.13) и (4.14).

Из (4.23), с учетом (4.17) и (4.19) получена формула для толщины вязкого подслоя в потоках растворов полимеров [214]

$$\delta_s = (1 + 0.608C[\mu]_0 \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_2} \sum_{p=1}^n \frac{\omega\theta_1}{p^2 + \omega^2\theta_1^2})\delta, \quad (4.21)$$

по которой, используя формулу Л. Прандля (4.3) для ТТ, И.Л.Повх и А.Б.Ступин получили профиль скорости в потоке раствора полимера

$$\begin{aligned} \frac{u}{v_*} &= \frac{1}{k} \ln \frac{v_* y}{\vartheta} + \alpha k_a - \frac{1}{k} \ln \alpha k_a = \frac{1}{k} \ln Re^* + B + \Delta B = \\ &= \frac{1}{k} \ln Re^* + B_s, \end{aligned} \quad (4.22)$$

где

$$\begin{aligned} B_s &= 11,6(1 + 0.608C[\mu]_0 \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_2} \sum_{p=p_1}^n \frac{\omega\theta_1}{p^2 + \omega^2\theta_1^2}) - 2,5 \ln [11,6(1 + \\ &+ 0.608C[\mu]_0 \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_2} \sum_{p=1}^n \frac{\omega\theta_1}{p^2 + \omega^2\theta_1^2})] . \end{aligned} \quad (4.23)$$

Безразмерный профиль скорости, вычисленный по формуле (4.22), графически представлен на рис. 4.3. Из рисунка видно, что с ростом коэффициента k_a логарифмический профиль скорости смещается вверх, то есть увеличивается расходная скорость.

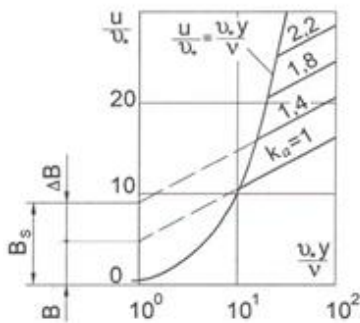


Рисунок 4.3 Безразмерный профиль скорости турбулентного потока полимерного раствора согласно модели (4.22) И.Л.Повха и А.Б.Ступина :
 k_a - коэффициент анизотропии динамической вязкости [214]

Такой же, по сути, подход к построению модели турбулентного течения полимерных растворов имеют представители школы академика АН СССР Л.И.Седова [208].

Следует отметить, что модели И.Л.Повха и А.Б.Ступина [214], а также Л.И.Седова с соавторами [208] являются двухслойным, как и модель Л. Прандтля, которую они взяли за основу. Г.Ф. Кобец [215] построил профили скоростей для круглых труб при течении водных растворов различных полимеров по данным экспериментов, выполненных исследователями школы академика АН СССР С. С. Кутателадзе [216], а также Ю. Ф. Иванютой и Л.А.Чекаловой [217] (рис. 4.4).

Видно, что при течениях полимерных растворов выделяются все три составляющие трехслойной модели Прандтля-Кармана. Линейное распределение скоростей распространяется тем дальше от стенки, чем больше величина снижения ГСТТ. При максимальном эффекте ГДАД безразмерная толщина вязкого подслоя $\delta_s^+ = N_s \approx 15$ [215], где N_s – число Никурадзе, аналогичное числу Re :

$$N = v_s \delta / \nu, \quad N_s = v_* \delta_s / \nu, \quad (4.24)$$

где δ, δ_s – толщины ВП в потоках растворителя и раствора, соответственно; ν – кинематическая вязкость растворителя; для ньютоновских жидкостей $N=10.5-11.0$.

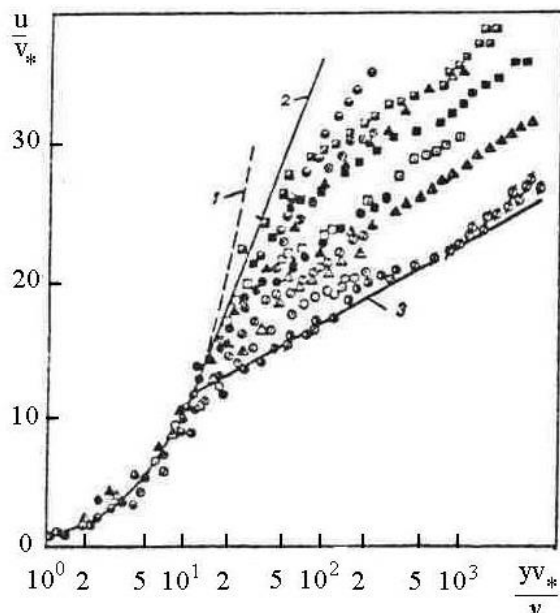


Рисунок 4.4 Структура полимерных потоков в круглых трубах по результатам измерений:

(1) - линейная часть профиля Л.

Прандля $u/v_* = u_* y / \nu$;

(2) - асимптота Вирка
 $u/v_* = 11.7 \ln(v_* y / \nu) - 17.0$;

(3) - логарифмическая часть профиля Л. Прандля

$u/v_* = 2.5 \ln(v_* y / \nu) + 5.5$ [215].

Переходной участок утолщается с увеличением влияния добавок. При достижении максимально возможного (при данном числе Re) снижения ГСТТ, что отвечает асимптоте наибольшего снижения сопротивления, буферный слой распространяется к оси трубы, а ядро потока с развитым турбулентным течением, которое имеет логарифмическое распределение скоростей с углом наклона $1/k$, отсутствует [218]. Асимптотический профиль Вирка (кривая 2) описывается логарифмической зависимостью:

$$\frac{u}{v_*} = A_\alpha \ln\left(\frac{v_* y}{\nu}\right) - B_\alpha, \quad (4.25)$$

где A_α и B_α – постоянные асимптоты, предложены такие их значения: $A_\alpha = 11,7 \dots 13,0$; $B_\alpha = 17,0 \dots 20,2$. В пределах $10 \leq v_* y / \nu \leq 15$ отличие между линейным и асимптотическим распределением скоростей перекрывается разбросом экспериментальных точек [215].

Следовательно, рассмотренные двухслойные модели и др. не учитывают все особенности течения растворов полимеров, поскольку при существенном снижении гидродинамического сопротивления турбулентного трения переходная область занимает большую часть живого сечения потока, а то и весь его объем. Распределение скоростей в переходной области такое же, как и в предельном профиле Вирка (4.25) [215]. Поэтому потоки растворов полимеров в трубах адекватнее отображает трехслойная схематизация профиля, предложенная Вирком [218]:

$$\frac{u}{v_*} = \frac{v_* y}{v}, \quad y \leq \frac{v_* y}{v};$$

$$\frac{u}{v_*} = A_\alpha \ln\left(\frac{v_* y}{v}\right) - B_\alpha, \quad \frac{v_* \delta}{v} \leq \frac{v_* y}{v} \leq \frac{v_* \delta_s}{v_s};$$

$$\frac{u}{v_*} = A \ln\left(\frac{v_* y}{v}\right) + B_s, \quad \frac{v_* \delta_s}{v_s} \leq \frac{v_* y}{v} \leq \frac{v_* r}{v};$$

$$B_s = B + \Delta B,$$

где v, v_s – кинематическая вязкость растворителя и раствора, соответственно; r – радиус трубы; δ_s – суммарная толщина ВП и переходной области в потоках растворов полимеров [215], которая вычисляется по (4.21); A, B – константы логарифмической части профиля Л. Прандтля для ньютоновских жидкостей, $A=1/k=2.5$; $B=5.1$ (см. (4.3)); A_α, B_α – константы асимптоты Вирка (см (4.25)); B_s – константа для течений растворов полимеров (см. (4.22) и (4.23)); ΔB – сдвиг логарифмической части профиля скорости (см. (4.22) и (4.23)), определяется, как длина отрезка асимптоты Вирка (4.25) между точками ее пересечения с логарифмическими кривыми для растворителя (4.3) и для раствора полимера (4.22):

$$\begin{cases} \frac{u}{v_*} = A_\alpha \ln\left(\frac{v_* y}{v}\right) + B_\alpha, \\ \frac{u}{v_*} = A \ln\left(\frac{v_* y}{v}\right) + B, \\ \frac{u}{v_*} = A \ln\left(\frac{v_* y}{v}\right) + B + \Delta B. \end{cases} \quad (4.27)$$

Решение системы уравнений (4.27) показывает, что

$$\Delta B = (A_\alpha - A) \ln k_\alpha. \quad (4.28)$$

Предложен ряд формул для вычисления гидравлического коэффициента сопротивления трения λ при течении воды с добавками полимеров в трубах. Среди них формула Ю.А. Войтинской [219]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot l g \left[\left(\frac{2.8 \cdot v_{*пор}}{v \sqrt{\lambda}} \right)^{\frac{\eta}{5.75}} \left(\frac{2.5}{Re_d \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta_e}{3.7d} \right) \right], \quad (4.29)$$

где $v_{*пор}$ – пороговая динамическая скорость, при достижении которой начинается снижение сопротивления турбулентного трения; η – коэффициент. Для ПАА принимают: $v_{*пор} \approx 0.05$ м/с; а при $0,005\% < C < 0,012\%$ берут $\eta \approx 1000C$. При отсутствии полимера ($C=0, \eta=0$) выражение (4.29) переходит в формулу Кольбрука для течений ньютоновских жидкостей [220]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{2,5}{Re_d \sqrt{\lambda}} + \frac{\bar{\Delta}}{3,7} \right), \quad (4.30)$$

где $\bar{\Delta} = \Delta_e/d$ – относительная эквивалентная шероховатость.

Г. Ф. Кобец, проинтегрировав распределение скоростей модели (4.26) с учётом экспериментальных значений: $A=2,5$; $B=5,1$; $(v_*y/\nu)=11,6$; $A_a=11,7$; $B_a=17$, получил формулу [215]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = [2 \cdot \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 0,8] + 7,51 \cdot \lg k_a - \frac{427k_a}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{710k_a^2}{Re^2\lambda}, \quad (4.31)$$

где в квадратных скобках выделен член, который представляет правую часть в законе сопротивления Прандтля - Кармана. Уравнение (4.31) характеризует общий случай течения полимерного раствора. Если распределение скоростей, описываемое в (4.26) вторым уравнением, распространяется на всё сечение потока, когда $v_*y/\nu = v_*\delta_s/\nu_s$, то зависимость $\lambda=f(Re)$ становится асимптотой Вирка

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 9,51 \cdot \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 19,4. \quad (4.32)$$

4.2. Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину

4.2.1. Основные закономерности

Наиболее полные данные о влиянии высокомолекулярных полимеров на сопротивление трения получены путем изучения течений их однородных растворов в трубах. К основным из них следует отнести следующие:

а) при ламинарном течении в гладкой и шероховатой трубах введение полимеров не оказывает влияния на сопротивление трения; полимерные растворы ведут себя подобно ньютоновской жидкости, не вызывая изменений в известных закономерностях сопротивления, при этом практически не меняется величина критического числа Рейнольдса, отвечающего переходу в турбулентный режим [221];

б) в турбулентном режиме течения снижение гидродинамического сопротивления наступает лишь при достижении некоторого числа Рейнольдса ($Re_{пор}$), при котором касательное напряжение на стенке трубы достигает порогового значения; это значение зависит от природы полимера и его концентрации в растворе [24];

в) максимальное снижение сопротивления трения наблюдается при достижении некоторой оптимальной концентрации полимера в растворе; дальнейшее ее увеличение приводит к снижению величины эффекта [3,6];

г) для каждого числа Re в гладких и шероховатых трубах есть предельные значения местных коэффициентов сопротивления, ниже

которых в полимерных растворах снизить сопротивление трения не удастся; этим предельным значениям соответствует «асимптотический» профиль распределения скоростей с протяженной переходной областью; предельно-допустимое минимальное гидродинамическое сопротивление трения в трубах за счет введения микродобавок высокомолекулярных полимеров описывается асимптотой Вирка:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 9.51 \cdot \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 19.4 . \quad (4.33)$$

д) в шероховатых трубах значительное снижение сопротивления в растворах полимеров наблюдается лишь в ограниченной области чисел Re ; при дальнейшем их увеличении эффективность воздействия полимерных добавок уменьшается [222];

е) под действием больших гидродинамических напряжений макромолекулы полимера в потоке склонны к деструкции (разрушению), что первоначально приводит к уменьшению величины эффекта снижения сопротивления, а в дальнейшем и к его полному исчезновению [26,223];

ж) в турбулентных потоках макромолекулы гидродинамически-активных полимеров наряду с механической деструкцией подвергаются окислительной деструкции, которая снижает величину эффекта снижения турбулентного трения;

з) зависимость величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения от концентрации полимера носит экстремальный характер; при этом максимальный эффект достигается при некоторой оптимальной его концентрации в растворе C_{opt} ; при $C < C_{opt}$ вязкость полимерного раствора незначительно превышает вязкость растворителя, при $C > C_{opt}$ величина гидродинамического эффекта уменьшается за счет увеличения вязкости раствора [24,224];

и) при заданной величине перепада давления ΔP (т.е. при фиксированном значении динамической скорости $v = \sqrt{\tau_w/\rho}$, где τ_w – касательное напряжение трения на стенке, ρ – плотность раствора), величина эффекта снижения зависит не только от концентрации полимера, но и от его среднего молекулярного веса;

к) большей эффективностью снижать гидродинамическое сопротивление трения обладают полимеры, макромолекулы которых имеют повышенную гибкость в растворах; так, например, более гибкие макромолекулы ПЭО эффективнее жестких макромолекул ПАА при их равных молекулярных массах [24,225].

4.2.2. Влияние различных факторов

При практическом использовании эффекта Томса часто приходится сталкиваться с фактами проявления различной гидродинамической

активности одними и теми же полимерами в различных физико-химических условиях. Причиной этому, как показали исследования, является изменение молекулярных характеристик полимеров в растворах в зависимости от внешних условий и состава жидкостей, в которых они растворены. Знание этих особенностей позволяет сделать правильный выбор полимеров для достижения максимального гидродинамического эффекта в заданных условиях. Одной из основных характеристик состояния высокомолекулярного полимера в растворе является его характеристическая вязкость. Для предельно разбавленных растворов (в которых и наблюдается снижение ГСТТ) характеристическая вязкость $[\eta]$ определяется соотношением [187]:

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C}, \quad (4.34)$$

где η , η_0 – вязкость раствора и растворителя; C – концентрация исследуемого полимера в растворе.

На практике характеристическую вязкость определяют экстраполяцией величины $(\eta - \eta_0)/\eta_0 C$ на нулевую концентрацию, используя полученные экспериментальным путем значения η и η_0 .

Согласно Флори [226] характеристическая вязкость связана с размерами макромолекулярного клубка следующим соотношением:

$$[\eta] = \Phi_0 \frac{(\bar{h}^2)^{3/2}}{M}, \quad (4.35)$$

где Φ_0 – константа Флори, \bar{h}^2 – среднеквадратичное расстояние между концами полимерной цепи, M – молекулярная масса полимера. В соответствии с приведенным уравнением можно сделать вывод, что об изменении размеров макромолекулярных клубков можно судить по характеристической вязкости полимерных растворов, которая, в свою очередь, будет определять величину эффекта снижения ГСТТ.

В ходе проведения физико-химических и гидродинамических исследований водных растворов ПЭО шести различных молекулярных масс была установлена зависимость величины эффекта снижения ГСТТ ($\Delta\lambda/\lambda$, %) от их характеристической вязкости $[\eta]$. Результаты эксперимента показали, что в диапазоне величин $[\eta]$ от 4 дЛ/г до 10 дЛ/г величина $\Delta\lambda/\lambda$, % возрастает от 0 до 80 %.

А.И. Торьяник [227] приводит результаты исследований по влиянию качества растворителя на конформационное состояние макромолекул ПЭО в растворах и величину эффекта снижения в них ГСТТ. При этом основное внимание было уделено выяснению влияния температуры, а также добавок различных солей и других химических веществ (неэлектролитов) на структуру воды, которая определяет величины характеристической вязкости и ГСТТ приготовленных на ее основе растворов.

Влияние температуры. В своих работах А.И. Торяник приводит результаты экспериментальных исследований по влиянию температуры на величину эффекта снижения ГСТТ в водных растворах ПЭО. Анализ представленных зависимостей величины коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ от числа Рейнольдса для водных растворов ПЭО показал, что с понижением температуры эффективность воздействия добавок возрастает [227].

Такое влияние температуры на величину коэффициента λ можно объяснить следующим образом. Макромолекулярная цепь ПЭО содержит эфирные кислороды, между которыми образуются мостики из трех молекул воды, стабилизирующие конформацию макромолекулярной цепи в растворе. Повышение температуры приводит к разрыву водородных связей, мостики разрушаются, и макромолекула сжимается, что приводит к уменьшению размеров полимерного клубка. Проверка описанного механизма действия структуры растворителя на конформацию макромолекулы была проведена с использованием численного моделирования методом Монте-Карло и было установлено, что водородно-связанные мостики стабилизируют максимально развернутую конформацию макромолекулярной цепи ПЭО в водном растворе [227].

Влияние добавок солей. Результаты экспериментальных исследований по влиянию концентрации различных солей на величину эффекта снижения ГСТТ приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Влияние природы солей и их концентрации на величину эффекта снижения ГСТТ ($\Delta\lambda/\lambda$, %) в водном растворе ПЭО, с молекулярной массой 10^6 . Содержание ПЭО в растворе – 0,0002 % вес. Температура исследуемых растворов – 20 °С [227]

№ п/п	Наименование соли (структурная формула)	Концентрация соли в растворе, моль/л						
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
		Величина эффекта снижения ГСТТ, %						
1.	Калий йодистый (KI)	59	59	59	59	58	58	57
2.	Едкий калий (KOH)	59	58	57	54	52	50	48
3.	Калий серноокислый (K_2SO_4)	59	57	56	52	48	40	30
4.	Калий углекислый (K_2CO_3)	59	55	51	40	32	0	-

Из приведенных в таблице данных видно, что на величину эффекта снижения ГСТТ влияние оказывает не только концентрация, но и природа соли.

Электролиты оказывают деструктурирующие действия на воду, т. к. их растворение приводит к разрушению сетки водородных связей в воде точно так же, как и повышение температуры. Поэтому растворение солей и увеличение их содержания в растворе приводит к свертыванию макромолекулярных цепей ПЭО в водных растворах. Этим и объясняется уменьшение величины $\Delta\lambda/\lambda$, %, особенно для сильных электролитов K_2SO_4

и K_2CO_3 (см. данные в строке 3 и 4 таблицы) по сравнению со слабым электролитом KJ (строка 1).

При решении вопроса практического применения снижающих гидродинамическое сопротивление полимерных добавок в обязательном порядке необходимо учитывать какие электролиты и в каком количестве находятся в стоках, подлежащих аварийной откачке. Из приведенных в таблице 4.1 данных следует, что чем сильнее электролит разрушает структуру воды, тем сильнее уменьшается характеристическая вязкость растворов ПЭО, а следовательно, в них пропорционально уменьшается и величина эффекта снижения ГСТТ.

Влияние соли возрастает с увеличением молекулярной массы ПЭО, т. е. высокомолекулярные полимеры оказываются более чувствительными к действию солей. Следует отметить, что аналогичный вывод следует и из сравнения температурных зависимостей характеристической вязкости водных растворов ПЭО различных молекулярных масс. Это является вполне естественным, т. к. одинаковое изменение конформационного состояния цепи приводит к большим абсолютным изменениям размеров макромолекулярных клубков ПЭО при увеличении длины цепи, т. е. молекулярной массы.

Полученные результаты указывают на необходимость учитывать для каждого конкретного случая влияния солей на характеристическую вязкость растворов ПЭО, а, следовательно, и на их ГСТТ.

Влияние добавок неэлектролитов. Особый интерес представляют результаты исследований по влиянию на гидродинамическую эффективность неэлектролитов, т. к. в зависимости от своей природы они могут оказывать как структурирующее, так и деструктурирующее действие на воду. Экспериментальные исследования проводились с использованием водных растворов ПЭО с молекулярной массой $M=3 \cdot 10^6$ при температуре $20^\circ C$. В качестве добавок неэлектролитов были выбраны два химических соединения – мочевина и ацетон, которые по-разному воздействуют на структуру воды. При этом мочевина оказывает деструктурирующее действие на воду, а ацетон, наоборот, ее структурирует. Полученные экспериментальные данные показали, что с ростом концентрации мочевины в растворе величина эффекта снижения ГСТТ постоянно падает, а при добавлении ацетона к раствору ПЭО – растет.

На основании проведенного анализа по влиянию температуры, добавок солей и неэлектролитов можно сделать вывод, что молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления заключаются в том, что величина достигаемого гидродинамического эффекта определяется не только молекулярной массой полимера, но и состоянием макромолекулярного клубка, его размерами, которые являются следствием конформации макромолекулярной цепи, зависящей от внешних условий и состава растворителя.

Влияние водородного показателя среды pH . При аварийной откачке сточных вод химических предприятий важно знать, какое влияние на величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления $\Delta\lambda/\lambda$, % оказывает их водородный показатель (pH).

В работе И.Л. Повха, А.Б. Ступина с соавторами [228] приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию pH на величину $\Delta\lambda/\lambda$, % для четырех концентраций водных растворов ПАА. Изменение pH в растворах проводили путем введения небольших количеств соляной кислоты и едкого натрия. Установлено (рис. 4.5), что наибольший гидродинамический эффект проявляется в области значений $pH = (5-10)$. При этом величина $\Delta\lambda/\lambda$, % для растворов, содержащих 10^{-4} ; $2 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ ПАА лежит в диапазоне 52,5 – 63,0 %. Уменьшение величины pH ниже 5 и увеличение больше 10 приводит к резкой потере растворами гидродинамической эффективности.

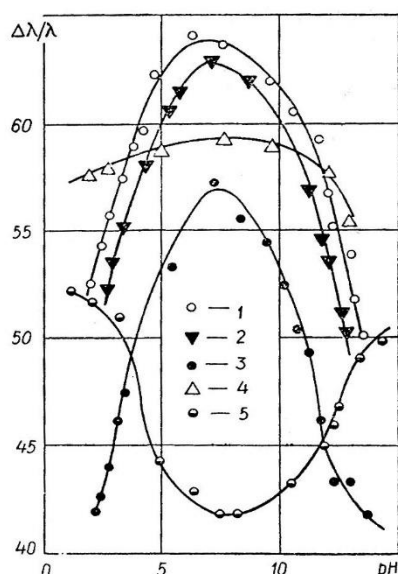


Рисунок 4.5 Зависимость величины эффекта ГСТТ ($\Delta\lambda/\lambda$, %) от водородного показателя среды pH в водных растворах ПАА.
Концентрация ПАА в растворах равна: 10^{-4} ; $2 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$ г/см³
(кривые 1, 2, 3, 4) [228].

В связи с вышеизложенным, при практическом использовании явления снижения ГСТТ добавками высокомолекулярных полимеров (ВМП) необходимо учитывать каким значением водородного показателя характеризуется жидкая среда, в которой будет растворяться гидродинамически-активный полимер.

Достичь наиболее высокой гидродинамической эффективности полимера можно выбором оптимальных условий, способствующих наибольшему разворачиванию полимерного клубка. При отсутствии возможности реализовать этот путь следует заняться поиском другого полимера, для которого данные условия будут наиболее благоприятными. Так, например, при высоких температурах гидродинамическая эффективность ПЭО падает, в то же время для полиакриламида она сохраняется на достаточно высоком уровне благодаря другому типу гидратации мономерных звеньев.

Раздел 5. Методы, аппаратура и экспериментальные установки для проведения исследований, характеристика составных компонентов ВПК [7]

5.1. Общие сведения

В процессе разработки составов, основ технологии приготовления и применения ЖВПК и ТВПК необходимо проводить комплексные исследования их физико-химических свойств и гидродинамической эффективности их растворов. Так, например, для ЖВПК (суспензий и паст) необходимо определять их плотность и вязкость, агрегативную и седиментационную устойчивость, скорость и полноту растворения входящих в их состав полимерных частиц при различных условиях. Кроме этого, в приготовленных растворах необходимо постоянно контролировать молекулярную массу полимера и величину эффекта снижения ГСТТ.

В процессе исследования физико-химических свойств ТВПК (полимерных покрытий и брикетов) необходимо знать их плотность, скорость и полноту растворения полимера, его концентрацию в приготовленных растворах, молекулярную массу макромолекул и т.д.

В ходе исследований были использованы общеизвестные, а также дополнительно разработанные методики определения полимеросодержания, вязкости, плотности, седиментационной и агрегативной устойчивости ЖВПК, скорости и полноты их растворения, определения концентрации полимера в растворах и контроля его молекулярной массы.

Для оценки гидродинамической эффективности растворов ЖВПК и ТВПК в лабораторных условиях были созданы турбулентные реометры, ротационные установки и различные трубные спецстенды. Это позволило в полной мере определить гидродинамическую эффективность композиций и условия их применения на практике.

Для эффективного приготовления ВПК необходимо знать физико-химические свойства их составных компонентов — высокомолекулярных полимеров, поверхностно-активных веществ (ПАВ), щелочей, неорганических солей, спиртов, органических растворителей и различных наполнителей. В связи с этим в монографии приведены характеристика и основные свойства этих химических веществ.

5.2. Свойства составных компонентов ВПК

5.2.1. Высокомолекулярные полимеры [187,226,229-236]

5.2.1.1. Полиэтиленоксид [187,226,229]

Полиэтиленоксид (полиокс, алкокс, ПЭО) является одним из наиболее распространенных синтетических водорастворимых гетероцепных

кислородсодержащих полимеров. Звенья молекулы ПЭО имеют следующую структурную формулу: $[-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}-]_n$ [187].

ПЭО различной молекулярной массы можно условно разбить на две группы, различающихся по свойствам и применению. Первая группа – это низкомолекулярные продукты, называемые также полиэтиленгликолями (ПЭГ). Молекулярная масса ПЭГ лежит в пределах от $2 \cdot 10^2$ до $4 \cdot 10^4$ [187,226].

Вторую группу составляют полиэтиленоксиды, имеющие молекулярную массу от $2 \cdot 10^4$ до 10^7 . Из них наиболее широко известны полиэтиленоксиды, выпускаемые в США под марками полиокс (Polyox), WSR, FRA, коагулянт, а также в Российской Федерации различных модификаций, отличающиеся между собой молекулярной массой. В настоящей работе рассматриваются свойства и применение только высокомолекулярного ПЭО.

Из многочисленных полезных свойств высокомолекулярного ПЭО следует особо выделить два – уникальную растворимость в воде и термопластичность, которые определяют их чрезвычайно широкое применение. Несмотря на относительно большие молекулярные массы ПЭО обладает весьма высокой степенью кристалличности, которая может достигать 95 %. Высокая упорядоченность строения твердого ПЭО обеспечивает ему устойчивую температуру плавления.

Для облегчения переработки и улучшения прочностных характеристик готовых продуктов в условиях повышенной влажности, ПЭО можно совмещать с пластификаторами (глицерин, полиэтилен – и пропиленгликоли, сорбит, моно- и триацетаты глицерина и др.), а также наполнителями (диатомит, окись кремния и т.д.).

При нормальных условиях ПЭО растворяется не только в воде, но и во многих органических растворителях: четыреххлористом углероде, бензоле, ацетонитриле, хлороформе, диоксане, метиловом спирте и др. В глицерине, этилен- и диэтиленгликоле ПЭО не растворяется даже при нагревании. Однако введение в нерастворяющие полимер жидкости незначительных количеств метилового спирта может привести к растворению полимера. Следует также отметить, что растворимость ПЭО в органических растворителях значительно улучшается за счет наличия в них следов воды. Это связано с уникальным свойством этого полимера смешиваться с водой в любых соотношениях.

Растворы высокомолекулярных ПЭО проявляют псевдопластические свойства, т.е. их вязкость уменьшается при увеличении сдвигового напряжения. Такой характер течения разбавленных растворов ставит вопрос об обязательном измерении вязкости в зависимости от концентрации ПЭО и напряжений сдвига, т.к. в противном случае полученное значение характеристической вязкости $[\eta]$ не будет истинным. Это особенно важно в тех случаях, когда значение характеристической вязкости в дальнейшем

используется для расчета молекулярной массы полимеров по соотношению Марка-Куна-Хувинка [28]:

$$[\eta] = K \cdot M^\alpha,$$

где K и α – константы, имеющие различные значения в различных растворителях для области умеренных и больших молекулярных масс ПЭО [187,226].

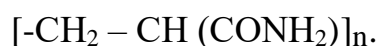
Перспективы широкого применения ПЭО и композиций на его основе в различных технологических и производственных процессах вызывают необходимость изучения влияния этого полимера на живой организм. Исследования многих авторов [232,237] показали, что даже высокомолекулярные образцы $M = 2 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$ не вызывают интоксикацию при попадании в организм животных. Также не обнаружено влияние ПЭО на деятельность центральной нервной системы. Попадание водного раствора ПЭО на кожу человека, а также контакт 3 %-го раствора ПЭО с кожей в течении двух недель не приводили к ее раздражению и не вызывали аллергию.

5.2.1.2. Полиакриламид [174,226,234-236]

Полиакриламид (ПАА, ПАМ) является одним из водорастворимых полимеров, получившим очень широкое распространение. Комплекс ценных свойств, относительная дешевизна и большой объем промышленного производства определили его интенсивное использование в горнорудной, нефтедобывающей, угольной, химической промышленности, сельском хозяйстве, строительстве.

В последние годы ПАА широко применяется для решения экологических проблем – при очистке промышленных и сточных вод, при уплотнении осадка, укреплении грунтов, нейтрализации источников загрязнений и т.д.

ПАА сравнительно легко растворяется при перемешивании в воде, формальдегиде, диэтилсульфоксиде с образованием однородных высоковязких растворов. Молекулы ПАА имеют следующую структурную формулу:



ПАА плохо растворим (примерно 1% вес.) в глицерине, этилен- и пропиленгликоле, молочной и ледяной уксусной кислотах. Поэтому эти вещества используют в качестве пластификаторов ПАА. В спиртах, кетонах, неполярных растворителях ПАА не растворяется [226].

При нагревании до температуры выше 120-130°C происходит имидизация ПАА с полной потерей его растворимости. Температура стеклования ПАА около 165°C. Чистый ПАА не токсичен [174,226,237].

5.2.2. Поверхностно-активные вещества [238-244]

ПАВ, обладая рядом уникальных свойств, к которым в первую очередь следует отнести способность их молекул адсорбироваться на поверхности раздела фаз «жидкость – твердое тело» и взаимодействовать с макромолекулами ПЭО в растворе, с образованием гидрофобных комплексов, могут найти широкое применение при разработке составов и основ технологии приготовления ЖВПК, ПВПК и ТВПК.

Типичные ПАВ представляют собой [187] органические соединения, молекулы которых имеют дифильное строение, т.е. содержат лиофильные и лиофобные группы. Гидрофильные группы обеспечивают растворимость ПАВ в воде, а гидрофобные (обычно углеводородные), при достаточно высокой молекулярной массе, способствуют растворению ПАВ в неполярных средах. В адсорбционном слое, на границе раздела фаз, дифильные молекулы ориентируются энергетически наиболее выгодным образом: гидрофильные группы – в сторону полярной (обычно водной) фазы, а гидрофобные – в сторону неполярной (газовой или углеводородной) фазы.

По типу гидрофильных групп различают ионные и неионные ПАВ. Первые диссоциируют в растворе на ионы, одни из которых поверхностно-активны, а другие (противоионы) – нет. В зависимости от знака заряда поверхностно-активного иона ПАВ делят на анионактивные, катионные и амфотерные (амфолитные). Молекулы неионных ПАВ не диссоциируют в растворе и сохраняют электрическую нейтральность.

Наиболее характерными анионактивными ПАВ являются алкилсульфаты, структурная формула макромолекул которых записывается в виде $ROSO_3M$, где R – первичный или вторичный радикал, а M – ионы Na , K , а также NH_4 . Наиболее важны высшие алкилсульфаты ($R=C_8-C_{18}$). Анионные ПАВ легко растворимы в воде с образованием мицеллярных растворов.

К наиболее важным неионным ПАВ относятся полиоксиэтилен-алкилфеноловые эфиры (полиэтиленгликолевые эфиры алкилфенолов), структурную формулу молекул которых можно записать в виде:



Прежде всего к таким химическим соединениям относятся: эмульгатор ОП-4 ($n=8-10$, $m=3-4$) – вязкая коричневая жидкость, растворимая в маслах, спиртах, бензоле; эмульгируется в воде; не растворима в эфире, уайт-спирите, CCl_4 ; препараты ОП-7 и ОП-10 ($n=8-10$, $m=6-7$ и $10-12$, соответственно) – маслообразная жидкость и паста соответственно, от желтого до коричневого цвета, растворимые в воде, спиртах, бензоле, плохо растворимы в CCl_4 ; смачиватель ДБ (R = трет – C_4H_9 , $m=6-7$) – вязкая коричневая жидкость, растворимая в воде, спиртах, бензоле, плохо растворим в эфире и CCl_4 .

Критические концентрации мицеллообразования (ККМ), поверхностное натяжение и гидрофильно-липофильный баланс для ОП-7 составляют соответственно 0,1 г/л; 29 мН/м и 10,9; для ОП-10 – соответственно 0,15 г/л; 31 мН/м и 13,5; для ДБ – 0,8 г/л; 29 мН/м и 10 [187].

В химической технологии из катионных ПАВ наиболее часто используются хлориды алкилпиридиния с количеством атомов углерода в углеводородной цепи C₁₆–C₁₈, а также хлориды и иодиды цетилпиридиния, лаурилпиридиния, цетил-γ-пиколиния и пропил-γ-пиколиния.

В проведенных авторами работах при создании составов и основ технологии приготовления ЖВПК, ПВПК и ТВПК использовались следующие ПАВ: из анионных – алкилсульфаты натрия с количеством атомов углерода в углеводородной цепи C₁₀–C₁₈; из неионных – ОП-7 и ОП-10, из катионактивных – алкилпиридиний хлористый (АЛПХ), а также цетилпиридиний хлористый (ЦПХ), промышленные пасты – метаупон и диталан OTS.

5.2.3. Неорганические соли и щелочи [187]

Одним из путей улучшения физико-химических свойств и эксплуатационных качеств полимерных композиций (агрегативной и седиментационной устойчивости, вязкостных характеристик, скорости растворения и т.д.), а также повышения гидродинамической эффективности однородных растворов полимеров является введение в их состав различных солей. При этом особо следует отметить, что применяемые соли обязательно должны хорошо растворяться в ДС и воде.

Известно, что основными жидкостями, которые могут использоваться в процессе приготовления ДС, для полимерных суспензий и паст, являются глицерин, диэтиленгликоль и этиленгликоль. Однако их применение в чистом виде для создания высокоэффективных ЖВПК и ПВПК связано с рядом трудностей, основной из которых является отличие их плотностей от плотности тонкодисперсных частиц полимера, которая, например, для ПЭО лежит в пределах (1,18-1,25) г/см³.

Глицерин, диэтиленгликоль и этиленгликоль при 20°C имеют плотности, равные 1,2604, 1,1161 и 1,103 г/см³ соответственно. В связи с этим в суспензии ПЭО, ДС которой является глицерин, его частицы будут всплывать, а в случае использования этиленгликоля и диэтиленгликоля – оседать.

В результате анализа справочных данных [187] и проведенных экспериментальных исследований было установлено, что наиболее оптимальными для создания равноплотных суспензий ПЭО являются: снижение плотности глицерина за счет добавления к нему воды, а повышение плотности этиленгликоля и диэтиленгликоля – за счет

растворения в них солей, преимущественно тяжелых металлов – $Pb(NJ_3)_2$, $MnCl_2$ и др.

Особую группу, как будет показано ниже, представляют ЖВПК и ПВПК в качестве ДС которых используются водные растворы щелочей ($NaOH$, KOH и $LiOH$). Такие ДС характеризуются пониженной вязкостью (особенно при низких температурах), повышенной скоростью растворения, позволяют увеличить содержание ПЭО в жидких композициях до 34% вес.

В связи с тем, что канализационные стоки, подаваемая в процессе аварийной откачки вода и огнетушащие жидкости на основе воды имеют различный солевой состав, в ходе выполнения работ были проведены специальные исследования по влиянию природы и концентрации различных солей на величину эффекта снижения ГСТТ. При этом цель исследований заключалась в установлении закономерностей влияния солей на структуру воды, ее влияния на физико-химические свойства полимерных растворов и величину достигаемого в них гидродинамического эффекта.

5.2.4. Спирты и органические растворители [187]

Спирты (алкоголи) — это органические соединения, которые содержат в молекуле одну или несколько OH -групп у насыщенных атомов углерода. По числу групп OH в молекуле различают: одноатомные спирты (из них алифатические спирты, в зависимости от характера радикала, связанного с OH -группой, могут быть первичными - RCH_2OH , вторичными - $RR'CHOH$ и третичными - $RR'R''COH$); двухатомные (или гликоли); трехатомные (глицерины) и многоатомные спирты.

Этиленгликоль ($HOCH_2CH_2OH$) представляет собой густую бесцветную жидкость, которая хорошо смешивается с водой (образует дигидраты), спиртами, ацетоном, глицерином, ледяной уксусной кислотой. Плотность этиленгликоля при температуре $20^{\circ}C$ равна $1,1133 \text{ г/см}^3$ [187].

Диэтиленгликоль ($HOCH_2CH_2OCH_2CH_2OH$) является одним из простейших двухатомных спиртов, представляет собой густую бесцветную жидкость, которая хорошо смешивается с водой. Температура плавления и кипения диэтиленгликоля соответственно равны $-8^{\circ}C$ и $245^{\circ}C$. Плотность при температуре $20^{\circ}C$ равна $1,1161 \text{ г/см}^3$.

Этиленгликоль и диэтиленгликоль могут использоваться в качестве составных компонентов ДС в технологических процессах приготовления равноплотных тонкодисперсных суспензий и паст на основе ПЭО [7,40,48].

Глицерин ($CH_2OH-CHOH-CH_2OH$) является простейшим соединением из трёхатомных спиртов. Он представляет собой густую бесцветную жидкость, которая смешивается с водой в любых соотношениях. Температуры плавления и кипения глицерина, соответственно равны $17,9^{\circ}C$ и $290,0^{\circ}C$. Плотность при $20^{\circ}C$ равна $1,2604 \text{ г/см}^3$.

В проведенных исследованиях глицерин использовался в качестве основного компонента дисперсионных сред (ДС) при создании равноплотных тонкодисперсных суспензий и паст на основе ПЭО. В качестве растворителя ПЭО в процессе приготовления ЛКМ для получения покрытий использовались хлористые метилен или этилен.

5.2.5. Наполнители [187]

Наполнители полимерных материалов обычно применяют для облегчения переработки полимеров и (или) улучшения эксплуатационных свойств получаемых изделий.

Установлено, что введение в составы полимерных покрытий наполнителей значительно увеличивает массоотдачу полимеров, в процессе их растворения. В качестве таких наполнителей могут быть использованы: всплывающие алюминиевая и бронзовые пудры, окись хрома, дисульфид молибдена и др.

Наполнители необходимо также вводить в состав высококонцентрированных включений (ВКВ) при создании ЖВПК с повышенным полимеросодержанием.

ВКВ приготавливали путем холодного прессования смеси тонкодисперсных порошков ПЭО и наполнителя - карбоната кальция или гидрофобного аэросила.

5.3. Приготовление растворов гидродинамически-активных добавок [7]

В проведенных экспериментальных исследованиях использовались растворы следующих гидродинамически-активных добавок: а) высокомолекулярные полимеры с линейной структурой макромолекул: ПАА - технический гель с концентрацией основного вещества близкой к 8% вес. Калужского ПО «Хлорвинил» (сейчас ОАО «Ориана»), ТУ 6-01-1049-81; ПАА - в виде тонкодисперсного полимерного порошка производства НИФХИ им.Л.Я.Карпова (г.Москва); Polyox Coagulant (ПЭО) - порошок с молекулярной массой до $6,5 \cdot 10^6$ американской компании «Union Carbid»; ПЭО – (производства НИИ химической технологии (г.Новосибирск, Россия)) в виде порошков различной дисперсности и с молекулярной массой $(2,5 \div 6,0) \cdot 10^6$; природные полимеры (экзополисахариды) различных производителей и с различными молекулярными массами. б) МПАВ: метаупон - промышленная паста Metaupon OMT-Paste, konz 2, производства предприятия «Walter Ulbricht» (Германия); диталан - промышленная паста Ditalan OTS-45, того же производства; натриевые соли карбоновых кислот, алкилсульфаты натрия, цетилпиридиний хлористый и др.

Расчёт концентрации в приготавливаемых водных растворах порошкообразных ПЭО и ПАА проводили по их массе. Навески порошка

ПЭО высыпали в стеклянный сосуд, наполненный водопроводной водой, подогретой до 40°C , при тщательном перемешивании смеси. Порошки ПЭО и ПАА проходили стадию набухания на протяжении суток. Перемешивание растворов в процессе растворения полимеров, проводили с использованием низкооборотных мешалок.

В процессе исследований использовались растворы ПАА с массовой концентрацией $10^{-7} \dots 10^{-3} \text{ кг/кг}$ и ПЭО с $C = 10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ кг/кг}$.

Массовые концентрации водных растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (метаупона и диталана), которые приготавливались для исследований, рассчитывали по фактическому их содержанию в пастах, с учетом вычета содержания воды.

Расчетные навески ПАА помещали в стеклянные сосуды с подогретой до 40°C водопроводной или дистиллированной водой, в которых они тщательно перемешивались. После 10-16 часов отстаивания, при периодическом перемешивании, содержание емкостей выливали в баки спецстендов для приготовления рабочих растворов.

Метаупон и диталан проявляют свою гидродинамическую активность только при наличии в растворах электролитов. Хлористый натрий растворяли отдельно и вливали в ёмкости с МПАВ. Дополнительным введением водопроводной или дистиллированной воды доводили содержание ёмкостей до расчётных объемов. После этого растворы МПАВ были готовы к использованию.

Водородный показатель используемой для приготовления растворов анионоактивных МПАВ воды лежал в пределах 7,4-7,7. Для сохранения физико-химических свойств растворов МПАВ во времени водородный показатель среды для анионоактивных ПАВ поддерживали в диапазоне $pH=7,5-8,5$, а для катионоактивных $pH=2,5-4,5$.

5.4. Методики определения физико-химических свойств ЖВПК и их растворов [7]

5.4.1. Микроскопический анализ и турбидиметрия

Необходимость проведения микроскопических и турбидиметрических исследований ЖВПК и суспензий, образуемых в процессе разрыхления ТВПБ, вполне обоснована, т.к. применяемая на сегодняшний день классификация, например, грубодисперсные или тонкодисперсные суспензии полимеров в ДС, гомогенизирование и т.д. не позволяют в полной мере дать объективную характеристику исследуемому продукту.

В связи с тем, что в ЖВПК содержатся не только твердые полимерные частички, но и новообразования в виде взвеси, наряду с макроскопическим анализом считается целесообразным проводить турбидиметрические исследования с помощью визуальных колориметров и

фотоэлектроколориметров. В процессе проводимых исследований был использован фотоэлектроколориметр ФЭК-4.

Совместное проведение микроскопического и турбидиметрического анализов позволяло в полной мере охарактеризовать ЖВПК (с точки зрения находящихся в них твёрдых полимерных частиц) по размерам и форме.

5.5. Полимеросодержание, плотность и вязкость. Реологические свойства

Содержание составных компонентов в композициях обеспечивалось путём приготовления из них соответствующих навесок. Так, например, 25,0 %-я по весу ПЭО суспензия в водно-глицериновой смеси содержит 25,0 вес. % ПЭО и 75,0 вес. % смеси глицерина с водой.

Вязкость ДС и однородных водных растворов полимеров, в рамках проведенных работ, определяли с использованием стеклянных капиллярных вискозиметров ВПЖ-1 и ВПЖ-2 с диаметрами капилляров (0,37-0,7) мм.

Вязкость РТПС и РТПП определяли по времени истечения определённых объёмов водорастворимых полимерных композиций с применением вискозиметра ВЗ-4.

Определение реологических свойств. Важнейшей задачей реологических исследований является измерение значений характеристик, определяющих свойства текучести исследуемого продукта и их изменения при воздействии различных механических и технологических факторов. Для этих целей применяют вискозиметры различных конструкций.

При выполнении экспериментальных исследований использовали ротационный вискозиметр (Rheotest RN4.1), который позволяет в очень широком диапазоне напряжений сдвига и скоростей среза автоматически снимать кривые вязкости и текучести. Кроме этого, прибор позволяет получить данные, которые дают всеобъемлющее реологическое описание исследуемой среды. Управляемый персональным компьютером «Реотест», позволяет проводить, с помощью измерительного двигателя с высокими динамическими характеристиками, ротационные измерения при заданном напряжении сдвига.

Реологические исследования ЖВПК с повышенным полимеросодержанием проводили по методикам и на экспериментальной базе Института тепло-массообмена им. А. Лыкова НАН Республики Беларусь.

5.5.1. Агрегативная и седиментационная устойчивость

Агрегативная устойчивость. В связи с тем, что полимерные суспензии и пасты являются гетерогенными системами с огромной внутренней поверхностью раздела, они принципиально не устойчивы.

Наиболее доступным методом оценки агрегативной устойчивости систем является определение их вязкости в процессе хранения.

Проведенные испытания показали, что разработанные суспензии и пасты на основе ПЭО являются относительно агрегативно-устойчивыми системами в случае их хранения при обычных атмосферных условиях: (температура – 20°C, давление – 760 мм. рт. ст., относительная влажность – (60-70)%.

Устойчивость к расслоению. Известно, что скорость отстаивания разбавленных суспензий определяется по формуле:

$$V = C_n^{1/3} \frac{d^m \rho^{(m-2)/3} \Delta^{(m+3)/3} g^{(m+1)/3}}{\mu^{(2m-1)/3}} \quad (5.1)$$

где C_n – безразмерный коэффициент; d – диаметр частицы; Δ – разность плотностей твердой и жидкой фаз; ρ – плотность жидкой среды; g – ускорение свободного падения; μ – вязкость жидкой фазы, величина $m = 2$ при числе $Re < 1,6$, $m = 1,2$ при $1,6 < Re < 420$, $m = 0,5$ при $Re > 420$ [187].

При центробежном осаждении g заменяется на ωr^2 , где ω – угловая скорость вращения, а r – радиус.

Суспензия не будет расслаиваться, если плотности жидкости и твердых частиц равны, а также при размере частиц меньше $5 \cdot 10^{-3}$ мм, т.к. в этом случае мелкие частицы совершают броуновское движение. Скорость осаждения частиц падает с увеличением концентрации твердой фазы в суспензии и вязкости жидкой фазы.

Одной из причин расслоения полимерных суспензий и паст является разные плотности полимера и дисперсионной среды. Плотность полимера (например, ПЭО) изменяется от партии к партии и, как правило, лежит в пределах $1,18-1,25$ г/см³. При этом следует иметь в виду, что даже в пределах одной и той же партии для различных фракций ПЭО плотность отличается. Это приводит к расслоению ДФ и ДС. При этом одна часть полимерного порошка ПЭО всплывает, а другая оседает на дно емкости.

Устойчивость к расслоению ЖВПК исследовали путём использования разбавленных до 1,0 % вес. по полимеру суспензий с использованием торсионных весов и центрифугирования.

5.5.2. Скорость и полнота растворения

Скорость растворения выпускаемых промышленностью полимерных порошков ПЭО и ПАА зависит от ряда факторов к основным из которых относятся: природа, молекулярная масса полимера и гибкость его макромолекул; размер полимерных частиц; концентрация и химический состав сопутствующих в процессе синтеза и измельчения полимера примесей; степень кристалличности полимерных частиц; способ смешивания полимерного порошка с растворителем и т.д.

Процесс растворения полимерных порошков проходит три стадии: диспергирование полимерных частиц в растворителе, их набухание, размыв геля до получения однородного раствора.

Диспергирование полимерных частиц в растворителе определяется характеристиками смешивающих устройств. Однако, на сегодняшний день ещё не разработаны смешивающие устройства, которые за малые промежутки времени равномерно распределяют порошкообразный полимер по всему объёму растворителя, т.к. в нём образуются труднорастворимые сгустки геля. Поэтому для улучшения этого процесса на основе тонкодисперсных полимерных порошков приготавливают ЖВПК (равноплотные суспензии и пасты) в качестве ДС которых используют нерастворяющие полимер жидкости. При смешивании ЖВПК с водой полимер равномерно распределяется по всему объёму растворителя, и трудно размываемые сгустки геля не образуются. Эффективность диспергирования контролируется путём отбора проб в определённый момент времени из разных точек ёмкости, в которой происходит смешивание ЖВПК с водой, с последующим определением в них концентрации полимера.

Набухание — самый медленный процесс при растворении ВП. Степень набухания выражается отношением объёма (массы) набухшего полимера к его исходному объёму (массе). Степень набухания увеличивается во времени, постепенно приближаясь к равновесному значению [187].

Некоторые жидкости неограниченно совместимы с полимером (например, вода с ПЭО и ПАА). В таких случаях набухание приводит к полному растворению полимера и его переходу в вязкотекучее состояние.

В проведенных работах процессы набухания ПЭО и ПАА, в воде исследовались с использованием прибора Догаджина.

Полнота растворения ПЭО и ПАА существенно влияет не величину эффекта снижения ГСТТ в их растворах. В связи с этим в ходе создания ВПК и с учётом того факта, что время приготовления из них однородных растворов не должно превышать 20 секунд возникает необходимость установления связи между полнотой растворения полимера и снижением гидродинамического сопротивления.

В проведенных исследованиях полноту растворения ПЭО и ПАА при смешивании композиций на их основе с водой, определяли следующим образом. Через определённые промежутки времени из растворов отбирали пробы, на центрифуге из них отделяли нерастворившуюся часть полимера, а в полученных растворах определяли вязкость и величину эффекта снижения ГСТТ. Используя полученные данные по заранее построенным зависимостям величины вязкости и эффекта снижения ГСТТ от концентрации ВП определяли его содержание в исследуемом растворе.

Скорость растворения полимеров определяли как тангенс угла наклона касательной к кривой зависимости концентрации растворившейся части полимера в растворе от времени его растворения.

5.5.3. Определение концентрации полимера в растворе [245]

При решении проблемы определения концентрации ВП в растворах прежде всего следует исходить из того факта, что наличие полимера и его концентрация влияют на физико-химические свойства растворителя. К таким свойствам прежде всего следует отнести: вязкость, плотность, оптическую плотность, электропроводность, скорость звука и т.д. Кроме этого следует учитывать возможность использования свойств полимерных растворов снижать гидродинамическое сопротивление трения, а также проявлять аномально высокую «кажущуюся вязкость», которая начинает резко увеличиваться с некоторого порогового значения скорости, в условиях растягивающего потока усилия при сходящемся течении.

В зависимости от способа определения свойств растворов ВП методы определения концентрации ПЭО и ПАА можно разбить на следующие группы: фотометрические, вязкостные, ультразвуковые, электрохимические, емкостные, гидродинамические и т.д. Каждый из этих методов имеет свои особенности. К таким особенностям в первую очередь следует отнести: диапазон измерений, чувствительность, погрешность, условия проведения эксперимента, влияние на измерения изменения других параметров среды, аппаратурная оснащенность и т.д.

К большому сожалению на сегодняшний день нет такого метода, который решал бы проблему во всём диапазоне концентраций полимера в растворе. В процессе выполнения исследований использовались фотометрический и гидродинамический методы, а также способы определения концентрации полимера в растворах по измерению их вязкости и определению в них величины эффекта снижения ГСТТ.

Фотометрический метод. Определение концентрации полимера фотометрическим способом сводится к измерению интенсивности светового потока, прошедшего через исследуемый раствор. При проведении исследований по данному методу использовался промышленный прибор ЛМФ-2.

Концентрацию высокомолекулярных ПЭО и ПАА в водных растворах определяли с использованием построенных заранее калибровочных графиков. Для растворов полимера с известными концентрациями определяли оптическую плотность и по этим данным строили график зависимости оптической плотности D от концентрации C полимера в растворе. По величине оптической плотности в растворе с неизвестным содержанием полимера, используя заранее построенную кривую зависимости D от C , определяли концентрация ВП в исследуемом растворе. В качестве примера на рис. 5.1 приведена зависимость величины оптической плотности D от концентрации C полиэтиленоксида в растворе.

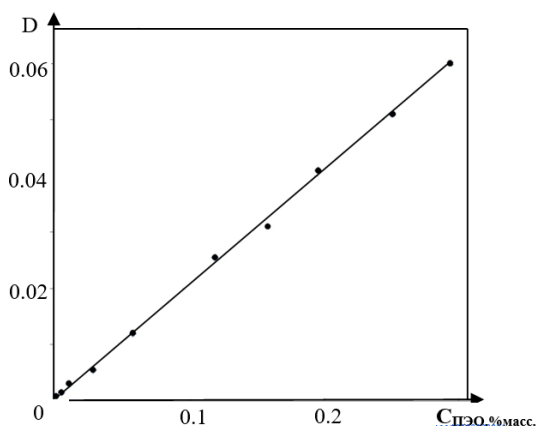


Рисунок 5.1 Зависимость величины оптической плотности D от концентрации ПЭО в растворе

При выполнении измерений необходимо соблюдать следующую последовательность. Из комплекта светофильтров и набора кювет необходимо подобрать такое их сочетание, при котором ошибка в определении концентрации полимера в растворе была минимальной. Для определения содержания ПЭО в растворах в диапазоне концентраций 0,005-0,3% использовали кювету длиной 30-50 мм. Определив оптическую плотность с использованием всех светофильтров, было установлено, что на участке длин волн 440-600 нм она постоянна и имеет величину, которая не зависит от длины волны. В связи с этим при проведении исследований были использованы светофильтры, обеспечивающие длину волны именно в этом диапазоне.

Гидродинамические методы. Течение через короткий капилляр. В этом методе используется течение растворов гидродинамически-активного полимера в условиях растягивающегося потока. Для создания зоны с продольным градиентом скорости можно использовать сходящееся течение, которое реализуется при истечении жидкости из цилиндрического сосуда в короткий капилляр. Для реализации этого метода в рамках настоящей работы было изготовлено устройство, принципиальная схема основного измерительного узла которого приведена на рис. 5.2.

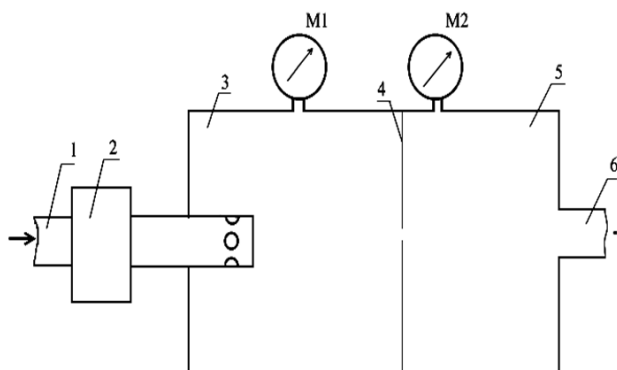


Рисунок 5.2 Принципиальная схема установки для реализации течения через короткий капилляр: 1- патрубок подачи исследуемого раствора в рабочую камеру 3; 2 — индукционный расходомер; 3 — рабочая камера 1; 4- короткий капилляр; 5- рабочая камера 2; 6- патрубок отвода отработанного раствора, M1 и M2 — образцовые манометры.

Принцип работы установки заключается в следующем. Из напорного бака исследуемый раствор по патрубку 1 подавался через расходомер 2 в рабочую камеру 3. После этого раствор через короткий капилляр 4 поступал в

камеру 5. Давление в рабочих камерах 3 и 5 контролировалось образцовыми манометрами М1 и М2.

Характерным для течений с растяжением является то, что в водных растворах полимеров наблюдается аномально высокая «кажущаяся» вязкость, начиная с некоторого значения скорости. Величина этой скорости зависит от концентрации и является характерной величиной. Результаты исследований для растворов ПЭО приведены на рис. 5.3 в виде зависимостей потерь давления в капилляре от расхода через него полимерного раствора. Концентрацию определяли путём сравнения полученных данных с калибровочным графиком, который построен для растворов с известными концентрациями ВМП.

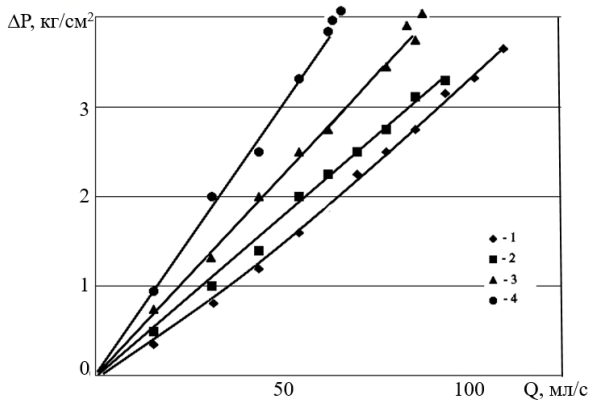


Рисунок 5.3 Зависимость перепада давления на концах короткого капилляра от расхода растворов с различным содержанием ПЭО (кривые 2, 3, 4 — соответствуют растворам, содержащим 0,004%; 0,02%; 0,04% ПЭО; 1 — вода).

Течение в каналах с переменным сечением. Еще один гидродинамический способ решения поставленной задачи основан на свойстве полимерных добавок существенно увеличивать гидродинамическое сопротивление в трубках с переменным сечением. В отличие от цилиндрических, такие трубки более чувствительны к наличию добавок, а зависимость их сопротивления от концентрации раствора не имеет экстремумов, что обеспечивает однозначное определение концентрации и более высокую точность измерения. Блок-схема установки приведена на рис. 5.4-а,б. Здесь же приведены общий вид и геометрические размеры канала переменного сечения.

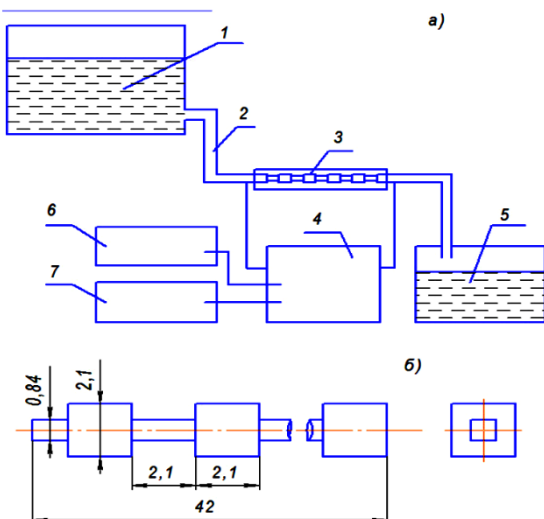


Рисунок 5.4 а,б. Принципиальная схема экспериментальной установки с каналом переменного сечения.

(а) 1 — бак для исследуемой жидкости, 2 — подводная трубка, 3 — канал переменного сечения, 4 — дифманометр, 5 — сосуд для слива жидкости, 6 — частотомер электронно-счётный ЧЗ-49, 7 — источник постоянного тока.

(б) Общий вид и геометрические размеры канала переменного сечения.

Истечение исследуемых полимерных растворов происходит из напорной ёмкости 1 по подводящей трубке 2 в канал переменного сечения 3. Перепад давления, возникающий при течении растворов по каналу, измерялся с помощью дифференциального манометра 4 посредством электронносчётного частотомера 6 с источником постоянного тока 7. Расход исследуемых растворов определялся объёмным способом. Отработанный раствор подавали в приёмную ёмкость 5.

С использованием данных измерений для течения свежеприготовленных растворов ПЭО известных концентраций строили кривые зависимости потерь давления в канале Δp от расхода в нём полимерного раствора q (см.рис. 5.5). Концентрацию ПЭО в исследуемых растворах определяли таким же путём, как и в предыдущем случае.

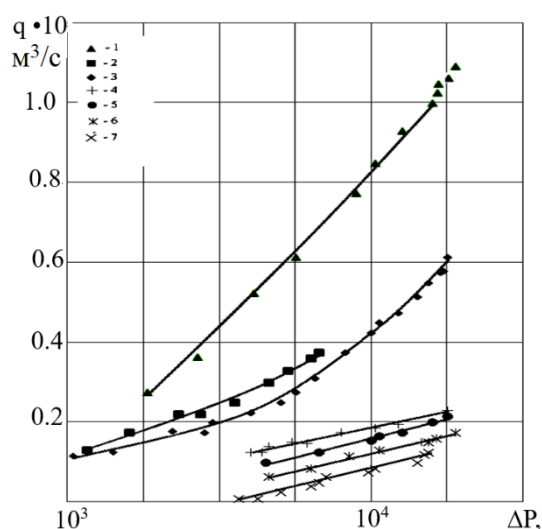


Рисунок 5.5 Зависимость потерь давления Δp от расхода q в канале переменного сечения для воды (кривая 1) и водных растворов содержащих 0,008; 0,01; 0,08; 0,25; 0,5 и 1,0 % мас. ПЭО (кривые 2-7 соответственно).

5.6. Оценка гидродинамической эффективности растворов ВПК

5.6.1. Влияние ГДАД на показания измерительной аппаратуры

Для определения гидродинамической активности добавок, установления границ их применения, а также при контроле качества растворов полимерных композиций в процессе хранения могут быть использованы различные трубные стенды (разомкнутого и замкнутого типа), а также ротационные установки (вращающиеся диски, коаксиальные цилиндры) [7,40,48].

В настоящем разделе приведены описания гидродинамических установок и методик проведения испытаний, использование которых даёт полную информацию в ходе лабораторных исследований и в процессе полупромышленных испытаний гидродинамической эффективности растворов ВП и МПАВ.

Влияние гидродинамически-активных добавок на гидравлическое сопротивление труб постоянного сечения значительно и зависит от геометрических параметров трубопроводов, закона их изменения вдоль по

течению, вида добавок, их концентрации в потоке и скорости его движения [246]. Гидродинамически-активные добавки также вносят изменения в работу измерительных приборов. В частности, они вызывают заниженные показания трубок Пито. При этом ошибка увеличивается с уменьшением диаметров их входных отверстий и с увеличением скорости течения [216]. Полимерные молекулы и их ассоциаты экранируют входные отверстия трубок полного напора, подобно действию твердых частиц, которые переносятся потоком. Использование термоанемометров сопровождается появлением аномальных импульсов, обусловленных изменением теплоотдачи в полимерных растворах при налипании полимерных молекул на нагревательный элемент.

Кроме этого, наличие гидродинамически-активных добавок в жидких средах, которые перемещаются через местные сопротивления, вносит изменения в структуру потока и распределение давлений, распространяющихся вверх [247,248] и вниз по течению [249]. Длина затопленной транзитной струи, например, после внезапного расширения трубы, при наличии добавок полимеров и МПАВ возрастает приблизительно вдвое [250]. Начальные участки потока в трубах, при наличии в них гидродинамически-активных добавок, существенно удлиняются за счет формирования ориентационного эффекта анизометрических частиц.

Эти особенности поведения растворов гидродинамически-активных добавок учтены при определении длины экспериментальных трубопроводов и расстояний между штуцерами для подсоединения дифференциальных манометров, а также при подборе и проектировании измерительной аппаратуры.

5.6.2. Турбулентные реометры [7]

Турбореометр относится к установкам разомкнутого типа, основным рабочим узлом которого являются капилляры с внутренним диаметром 1-3 мм. При выполнении настоящей работы использовались различные турбореометры которые отличаются способами регистрации измеряемых параметров, а также выбранной схемой вытеснения исследуемой жидкости через капилляр [40,48].

На рис. 5.6 представлена принципиальная схема турбореометра с механическим вытеснением жидкости и регистрацией перепада давления на известном участке капилляра с помощью тензодатчиков.

Величина эффекта снижения ГСТТ, при использовании гидродинамически-активных добавок, определяется по формуле:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \% = (1 - \Delta P_2 / \Delta P_1) \times 100\% \quad (5.2)$$

где ΔP_1 и ΔP_2 - перепады давления на измерительном участке капилляра при течении жидкости без полимерной добавки и с добавкой соответственно. Установка довольно сложна в изготовлении, ограничена по диапазону чисел Re из-за наличия механического редуктора и поэтому имела ограниченное применение.

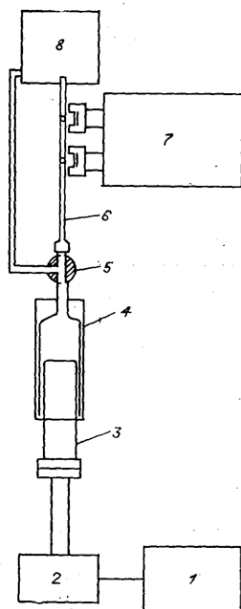


Рисунок 5.6 Схема турбореометра с механическим вытеснением жидкости..

1-электродвигатель; 2-редуктор; 3- поршень, 4- емкость с исследуемой жидкостью, 5- 3-х ходовой кран, 6- капилляр, 7- тензоусилитель с датчиком, 8- приемник.

На рис. 5.7 приведена схема турбореометра, в котором исследуемая жидкость продавливается через капилляр с помощью сжатого воздуха или инертного газа. Преимуществом этой установки является наличие термостатирующей рубашки, что позволяет проводить исследования в широком температурном интервале. Основной измеряемой величиной в данном случае является время истечения заданного объема жидкости. Для его измерения используется электронная схема, состоящая из индуктивных датчиков, усилителя, дискриминатора, триггера, двух катодных повторителей и электронного секундомера. Перепады напряжения, возникающие в датчиках при прохождении стального шарика, укрепленного на полом стержне и соединенном с поплавком, преобразуются электронной схемой и управляют работой хронометра. Рекомендуемые длина капилляра и диаметр равны $5 \cdot 10^{-4}$ м, 2,0 и $2,7 \cdot 10^{-3}$ м соответственно.

Коэффициент гидродинамического сопротивления, с учётом измеряемого времени истечения жидкости, вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{\pi^2 d^5 t^2 \Delta P}{8l\rho V^2}, \quad (5.3)$$

где d , l - диаметр и длина используемого капилляра, ρ , V - плотность и объем исследуемой жидкости, ΔP - перепад давления на концах капилляра, t - время истечения заданного объема исследуемой жидкости.

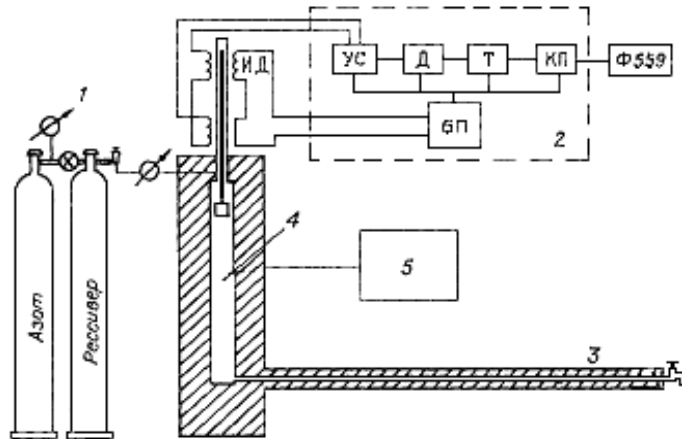


Рисунок 5.7 Схема установки для измерения ГСТТ: 1 - пневмосистема, 2 - электронное устройство для регистрации времени истечения, 3 - измерительная трубка, 4 - емкость с исследуемым раствором, 5 - термостат.

Величина эффекта снижения ГСТТ определяется по формуле:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \% = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} \times 100\%, \quad (5.4)$$

Здесь λ_1, λ_2 - коэффициент ГСТТ для чистого растворителя и раствора гидродинамически-активного вещества соответственно.

Учитывая, что перепад давления ΔP в данной установке одинаков для чистого растворителя и раствора, содержащего ГДАД, и, принимая во внимание равенство (5.3), уравнение (5.4) можно преобразовать к виду:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \% = [1 - (t_2/t_1)^2] \times 100\%. \quad (5.5)$$

В турбореометре (см. рис. 5.7) относительно сложным в эксплуатации является блок регистрации времени истечения. Хотя можно использовать более простые способы регистрации времени истечения жидкости определённого объёма, например по массе (объёму) жидкости, уже прошедшей капилляр.

На рис. 5.8 изображен турбореометр с фотоэлектрической регистрацией времени истечения. Узел регистрации, установленный на приёмном сосуде специальной формы, состоит из источника питания для двух маломощных ламп накаливания, фотодиодов ФСК-10, электронного таймера СТЦ-1.

При подаче в установку сжатого воздуха или аргона начинается протекание жидкости через капилляр и заполнение приёмного сосуда. В начальный момент течение происходит при неустановившемся режиме и первые порции жидкости не фиксируются и только после истечения примерно 1/5 части раствора, при прохождении уровня мимо нижнего фотодиода, включается таймер. После заполнения фиксированного объёма срабатывает верхний фотодатчик, который останавливает счётчик времени.

Кроме фотоэлектрической системы регистрации в процессе исследований также использовали узел измерения объёма вытекшей жидкости на магнитных контактах (герконах). Устройство узла иллюстрирует рис. 5.9, из которого видно, что магнитные контакты находятся внутри герметично запаиванной стеклянной трубки, по которой движется поплавков с закреплённым на нём кольцевым магнитом. Система работает аналогично узлу измерения на фотодатчиках, но проще в изготовлении и может использоваться при регистрации времени заполнения больших объёмов исследуемых жидкостей. Расчёт величины эффекта снижения сопротивления ведется по формулам (5.1) и (5.4).

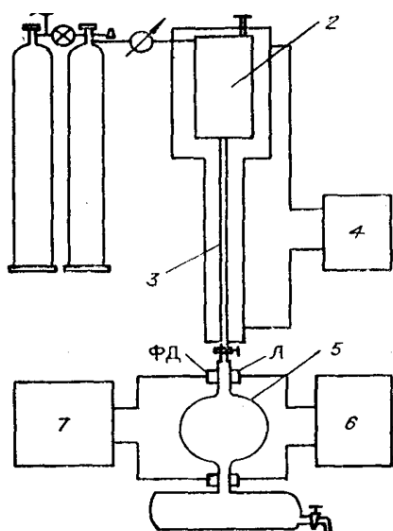


Рис. 5.8 Схема турбореометра.

1 - пневмосистема, 2 – сосуд с жидкостью, 3 – измерительная трубка (капилляр), 4-термостат, 5 - приёмный сосуд, оборудованный фотодатчиками (ФД), 6- блок питания, 7- электронный таймер.

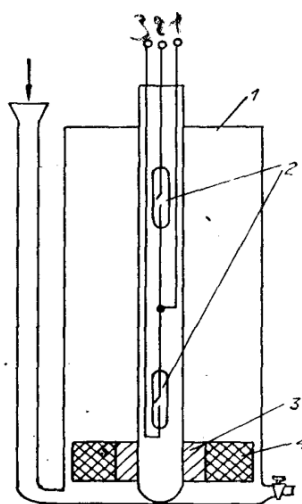


Рис. 5.9 Схема узла регистрации времени истечения.

1- сосуд; 2 - магнитный контакт; 3 – магнит; 4 – поплавок.

5.6.3. Трубные стенды [7,40,48]

Гидродинамические установки замкнутого типа предназначены для экспериментальной оценки растворов гидродинамически-активных материалов в трубах промышленных диаметров с различной шероховатостью. В основу работы таких установок положен принцип создания замкнутого (циркуляционного) течения жидкости по трубопроводу. Обычно такие установки имеют примерно одинаковую принципиальную схему, которая в общем виде приведена на рис. 5.10.

Наличие насоса и различных местных сопротивлений (задвижки, поворотные колена и т.д.) в таких устройствах позволяют исследовать процессы снижения ГСТТ в условиях близких к реальным.

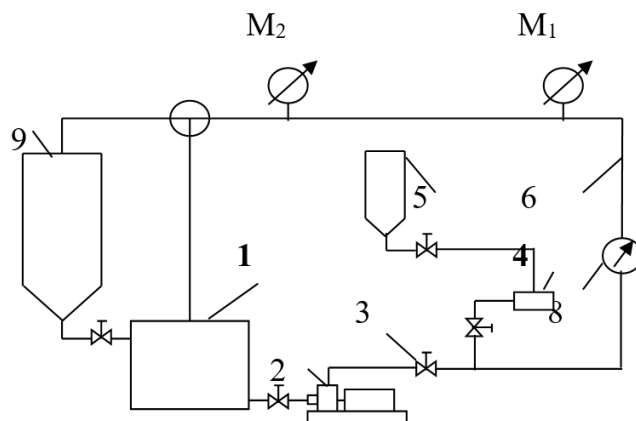


Рисунок 5.10 Схема гидродинамического стенда замкнутого типа.

1 - емкость; 2 - центробежный насос; 3 - задвижка для регулирования расхода жидкости; 4 - дозирующий насос; 5 - емкость с ГДАД; 6 - трубопровод; 7 - сменный измерительный участок; 8 - индукционный расходомер; 9 - измерительный бак.

Кроме этого, гидродинамические стенды такого типа позволяют проверить эффективность работы самых различных устройств по введению ГДАД в трубопровод. Возможность смены измерительных участков позволяет оценить эффективность гидродинамически-активных веществ в трубах различных диаметров. При этом при выборе длины измерительного участка необходимо соблюдать выполнение соотношения $L/d > 200$. Здесь L , d - длина измерительного участка и диаметр трубопровода соответственно.

Для ввода ГДАД в трубопровод обычно используют плунжерные дозирующие насосы типа НД соответствующей производительности. Перед испытанием полимерных растворов, обладающих снижением ГСТТ, трубные стенды тарируют с применением чистой воды с целью получения для неё кривых зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления трения от числа Рейнольдса.

При выполнении исследований также используются различные спецстенды разомкнутого типа для оценки гидродинамической эффективности растворов созданных полимерных композиций и работы генераторов различных конструкций. Кроме этого, на таких спецстендах отработывались режимы работы устройств подачи однородных растворов и растворов, приготовленных из композиций в трубопроводы централизованных систем водного пожаротушения, водоотведения, канализации и аварийной откачки воды.

5.6.4. Ротационные установки [7]

Для ряда исследований турбулентного течений растворов ВМП и МПАВ используются ротационные установки.

Принципиальная схема установки с коаксиальными цилиндрами, изображена на рис. 5.11.

Испытываемая жидкость заливается в зазор между цилиндрами. Наружный цилиндр приводится во вращение с помощью электродвигателя постоянного тока с электромагнитным усилителем в цепи обратной связи. Это позволило поддерживать с высокой точностью установленную скорость вращения наружного цилиндра независимо от нагрузочного момента на валу ротора. Число оборотов наружного цилиндра измеряли фотоэлектронным датчиком, который представляет собой закреплённый на валу ротора диск с отверстиями, пропускающими свет электрической лампочки на фотодиод. При этом частота вращения, пропорциональна скорости, измеряется частотомером.

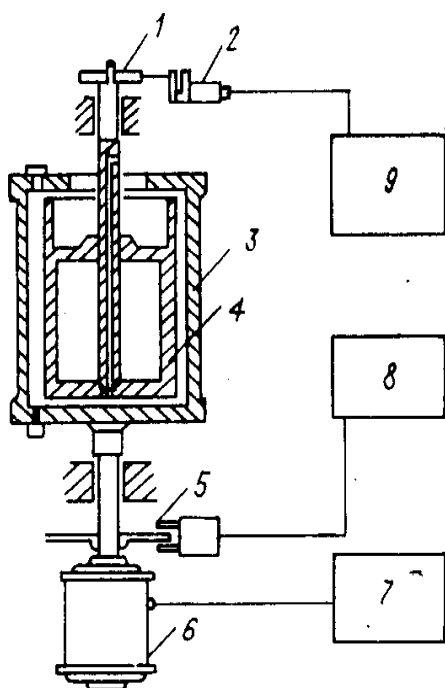


Рисунок 5.11 Принципиальная схема ротационной установки с коаксиальными цилиндрами.

- 1 - съёмный сектор; 2 - датчик силы;
- 3 - наружный цилиндр; 4 - внутренний цилиндр; 5 - датчик оборотов; 6 - двигатель;
- 7 - блок управления двигателем;
- 8 - частотомер; 9 – регистратор момента силы ГСТТ.

Момент силы гидродинамического сопротивления турбулентного трения измеряли на валу внутреннего цилиндра тензометрическим датчиком силы. Сигнал, поступающий с тензомоста и пропорциональный моменту силы трения, усиливается и измеряется цифровым вольтметром.

Коэффициент момента сопротивления C_M и числа Re рассчитывали соответственно по формулам:

$$C_M = \frac{\tau}{\rho U^2} = \frac{M}{\rho \omega^2} \times \frac{1}{2\pi R^4 L}, \quad (5.6)$$

$$Re = \frac{U\delta}{\nu} = \frac{\omega R\delta}{\nu} \quad (5.7)$$

Здесь τ - среднее напряжение сил трения на омываемой стенке наружного цилиндра, U - окружная скорость омываемой стенки наружного цилиндра; ω - угловая скорость вращения ротора; R и L - внутренний радиус и высота наружного цилиндра; δ - зазор между цилиндрами; ρ и ν -

плотность и кинематическая вязкость исследуемой жидкости; M - момент силы гидродинамического трения.

Кроме вращающихся коаксиальных цилиндров из ротационных гидродинамических установок использовали вращающийся диск. При этом коэффициент сопротивления C_M и число Рейнольдса Re вычисляли по формулам:

$$C_M = 2\tau/\rho\omega R^2, \quad (5.8)$$

$$Re = \omega R^2/\nu. \quad (5.9)$$

Одним из преимуществ ротационных установок является возможность прямого наблюдения за изменением величины эффекта снижения ГСТТ, которое происходит в результате постепенной потери эффективности снижающих турбулентное ГДАД (явление механической деструкции).

Необходимо отметить, что значения величины эффекта снижения ГСТТ для одного и того же полимера, полученные при одинаковых условиях на установках разного типа (трубных и ротационных), несколько различаются. Это необходимо учитывать при сопоставлении и использовании экспериментальных данных, полученных на различных установках.

5.7. Метрологическое обеспечение и оценка погрешностей измерений

Используемые приборы для определения физико-химических свойств и гидродинамической эффективности полимерных растворов из композиций были метрологически обеспечены согласно графику их поверки.

Математическая обработка экспериментальных данных приводилась на персональном компьютере с использованием электронных таблиц Lotus R123R3 и программы Microsoft Excel 7.0.

Коэффициент гидродинамического сопротивления трения λ , касательные напряжения τ_w , градиент скорости dv/dr определяли непрямыми способами через другие измеряемые величины.

Величины относительных погрешностей при определении физико-химических свойств, величин коэффициента ГСТТ и эффекта снижения ГСТТ были равны: для кинематической, динамической и характеристической вязкости – до $\pm 0,25$; плотности ВПК и их растворов – до $\pm 0,015$; концентрации основных компонентов в композициях и ГДАД в их растворах – до $\pm 0,02$; потерь напора в трубопроводах промышленных диаметров и давления при течениях в капиллярах трубодиаметров – до $\pm 0,03$ и $\pm 0,025$, соответственно; объёмного расхода жидкостей – до $\pm 0,025$; коэффициента ГСТТ и величины эффекта снижения ГСТТ – до $\pm 0,04$.

Раздел 6. Снижение ГСТТ в растворах МПАВ [7,58-68]

6.1. Корреляция между эффектом снижения и $ККМ_2$ [60]

Концентрация добавок МПАВ, при которой проявляется эффект снижения трения, составляет десятые доли процента и связана с величиной $ККМ_2$ (второй критической концентрацией мицеллообразования). С точки зрения устойчивости к механической деструкции добавки МПАВ имеют определенные преимущества перед полимерами. В отличие от последних растворы поверхностно-активных веществ, после прохождения через насосы и местные сопротивления, восстанавливают свою гидродинамическую эффективность (эффект «обратимой деструкции»). Асимметричные мицеллы МПАВ под воздействием механических сил со стороны гидродинамического поля разрушаются до сферических. При этом в потоке происходит одновременно два процесса – разрушение мицелл и их восстановление, поскольку последнее в растворе с достаточной концентрацией МПАВ является термодинамически выгодным. Применение МПАВ в замкнутых гидравлических системах, с учетом такого поведения мицелл, является предпочтительнее использования полимеров.

Критическая концентрация мицеллообразования – важная физико-химическая характеристика. Она характеризует склонность МПАВ к образованию мицеллярных структур и зависит как от особенностей молекулярного строения ПАВ, так и от внешних факторов: температуры, присутствия электролитов, полярных органических веществ и т. д.

Критические концентрации мицеллообразования ($ККМ_1$, $ККМ_2$ и т.д.) могут быть определены по изменению объемных (или поверхностных) свойств растворов МПАВ при повышении их концентрации. При $ККМ$ резко изменяется ход кривых концентрационной зависимости большинства физико-химических характеристик – поверхностного натяжения, электропроводности, светорассеяния, вязкости и др.

Критическая концентрация мицеллообразования в растворах ионогенных ПАВ может быть определена по измерению концентрационной зависимости электропроводности. Подвижность отдельных ионов будет заметно отличаться от подвижности агрегатированных ионов (мицелл), поэтому при $ККМ$ происходит резкое изменение этой зависимости. На рис. 6.1 приведены результаты измерения эквивалентной электропроводности пальмитата натрия $C_{15}H_{31}COONa$ (кривая 1) как функции от концентрации (на оси ординат отложена эквивалентная электропроводность в степени – 1).

Характер кривой вблизи $ККМ_1$ указывает на изменение состояния молекул растворенного вещества. Наблюдающийся спад кривой после $ККМ_1$ объясняется тем, что образующиеся ионные мицеллы хотя и переносят ток, но благодаря большему размеру менее подвижны в электрическом поле, чем неагрегированные ионы. Кроме этого, сильное

электростатическое притяжение со стороны заряженных мицелл связывает часть противоионов на их поверхности. Такая блокировка электрических зарядов также уменьшает электропроводность. ККМ₁ соответствует появлению в растворе пальмитата натрия сферических мицелл Гартли. При ККМ₂ на кривой $\sigma=f(c)$ наблюдается второй, более резкий излом. Он отвечает изменению степени агрегации молекул МПАВ, укрупнению мицелл и изменению их формы. Вероятно, при этом образуются анизометрические мицеллярные структуры – пластинчатые мицеллы, которые заряжены слабее сферических из-за меньшей диссоциации МПАВ при больших концентрациях, а также обладают меньшей подвижностью в электрическом поле по сравнению с мицеллами Гартли. Оба эти фактора и приводят к резкому снижению электропроводности при ККМ₂.

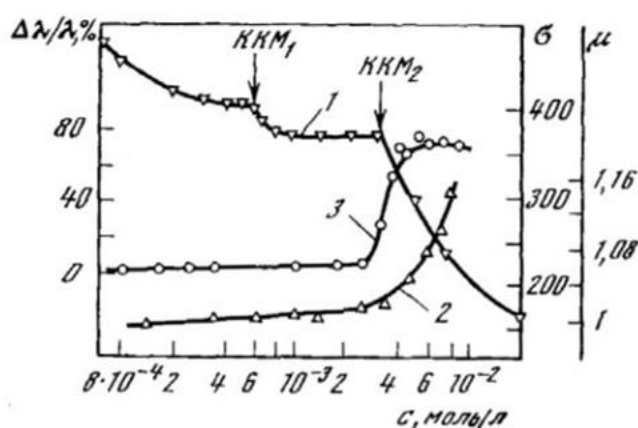


Рисунок 6.1 Зависимость величины эффекта снижения сопротивления $\Delta\lambda/\lambda$, величины, обратной эквивалентной электропроводности σ и относительной вязкости μ от концентрации пальмитата натрия C в растворе [60]

В области малых концентраций (выше ККМ₁) мицеллы МПАВ всегда симметричны, сохраняют сфероидальную форму и равномерно покрыты по поверхности гидратированными полярными группами. Это означает, что мицеллы вполне стабилизированы. Их межфазное натяжение – удельная свободная поверхностная энергия на границе с окружающей дисперсной средой – очень близко к нулю. Они не могут поэтому взаимодействовать друг с другом, образовывать анизометрические цепочки или пространственные сетки. Это легко обнаруживается реологическими методами. Вязкость таких коллоидных систем в широком интервале не слишком больших градиентов скорости подчиняется уравнению Эйнштейна, линейно возрастая с концентрацией. Это хорошо согласуется в области концентраций до ККМ₂ со снятой концентрационной зависимостью относительной вязкости водного раствора пальмитата натрия (кривая 2 на рис. 6.1). При дальнейшем возрастании концентрации, выше второй критической концентрации мицеллообразования ККМ₂, появляется ярко выраженная аномалия вязкости.

В области концентрации до ККМ₂ вязкость растворов пальмитата натрия невелика, линейно растет с концентрацией и не зависит от градиента скорости течения, что указывает на преимущественно сфероидальную

форму мицелл. При ККМ₂ появляется структурная вязкость, которая резко возрастает с увеличением концентрации. Это связано с превращением сфероидальных мицелл в асимметричные пластинчатые мицеллы, ориентация которых и вызывает отклонение от истинно вязкого течения. Следовательно, можно утверждать, что при ККМ₂ в растворе появляются анизометрические мицеллы.

Естественно, интересным с теоретической и практической точек зрения является вопрос о том, каким образом мицеллообразование в растворах ПАВ связано со снижением гидродинамического сопротивления. С целью установления корреляции между снижением сопротивления и мицеллярной природой растворов нами была исследована зависимость величины эффекта снижения сопротивления от концентрации пальмитата натрия в растворе (кривая 3). Видно, что эффект снижения ГСТТ проявляется при значении концентрации $C \sim$ ККМ₂. Затем в узкой области изменения концентрации пальмитата натрия величина эффекта достигает максимального значения (~70%).

6.2. Гидродинамическое сопротивление трения [7]

При рассмотрении турбулентных течений жидкостей одной из наиболее важных является зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ от числа Рейнольдса Re . Для течений растворов ПАВ возможны два подхода при построении таких зависимостей. Принципиальное отличие этих подходов проявляется при выборе вязкости в числе Рейнольдса. Вязкость растворов МПАВ сильно зависит от концентрации добавки, что обусловлено образованием в растворе анизометрических мицелл.

Выбор вязкости в числе Рейнольдса обусловлен конкретной задачей исследования. Добавки поверхностно-активных веществ вводят в турбулентный поток с целью уменьшить сопротивление трения по сравнению с течением чистого растворителя. Следовательно, при определении величины эффекта снижения сопротивления в трубах, в первую очередь, целесообразно рассматривать величину относительного уменьшения перепада давления на участке трубы, измеренного при одинаковых расходных скоростях течения растворителя и раствора. Отсюда вытекает определение величины эффекта снижения ГСТТ:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{100(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1},$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты сопротивления трения при течении растворителя и раствора соответственно. В соответствии с таким определением наглядное представление о величине действительного («технического») эффекта снижения сопротивления, при течении растворов дают графики связи

$\lambda=f(Re)$, построенные на базе чисел Рейнольдса, основанных на вязкости растворителя. Результаты опытов, представленные в виде графиков $\lambda=f(Re')$, где Re' – числа Рейнольдса, учитывающие вязкость раствора и его неньютоновские свойства, имеют целью подчеркнуть физическую сторону данного явления. На основании этих графиков «физический» эффект снижения сопротивления трения определяется путем сравнения сопротивления раствора и сопротивления ньютоновской жидкости, имеющей наибольшую для данного раствора вязкость. При таком представлении вычисленные значения оказываются завышенными по сравнению с фактическим («техническим») уменьшением сопротивления.

Результаты исследований коэффициента сопротивления трения λ при течении растворов технического ПАВ «метаупон» (далее просто метаупон) представлены на рис. 6.2 в виде зависимостей λ от чисел Рейнольдса Re , рассчитанных по вязкости воды (а) и по вязкости раствора (б).

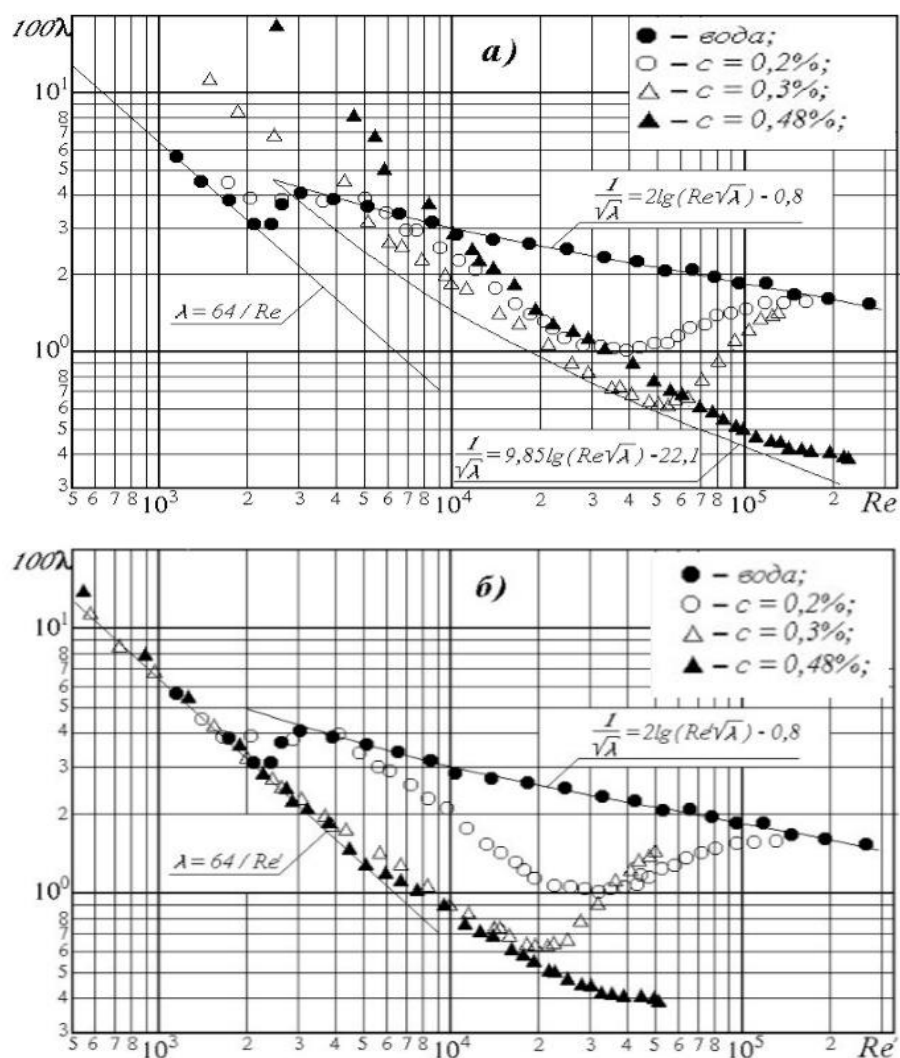


Рисунок 6.2 а, б Зависимости коэффициентов гидродинамического сопротивления трения λ от чисел Рейнольдса по вязкости воды Re (а) и от чисел Рейнольдса по вязкости раствора Re' (б) при течении воды и растворов метаупона

6.3.Профили скорости [251-256]

Результаты измерений профилей осредненной скорости в универсальных координатах $U^+ = f(y^+)$ для растворов метаупона с концентрациями 0,2 и 0,3 % представлены на рис. 6.3. Здесь безразмерная скорость определялась по выражению $U^+ = \langle U \rangle / U_*$, где $\langle U \rangle$ - осредненная по времени локальная скорость течения, $U_* = (\tau_w / \rho) / 2$ - динамическая скорость, τ_w - напряжение трения на стенке, ρ - плотность жидкости, а безразмерная координата $y^+ = U_* y / \nu$, где y - текущая нормальная к стенке координата ($y=0$ на стенке) рассчитывалась по вязкости раствора ν , определенной из закона Ньютона $\tau_w = \rho \nu (\langle U \rangle / dy)_{y \rightarrow 0}$. Измерения проводились при числах Рейнольдса, рассчитанных по вязкости растворителя, равных 10000, 21000 и 37000.

Из рисунка видно, что введение добавок приводит к значительным изменениям в распределении профилей скорости по сечению потока. При течении растворов метаупона они изменяются значительно круче в сравнении с универсальным профилем для ньютоновских жидкостей. На всех профилях скорости можно выделить те же три характерные зоны, удовлетворяющие трехслойной модели турбулентного течения в трубах, что и при течении ньютоновских жидкостей: вязкий подслой, переходную или буферную зону и зону турбулентного ядра. Вязкий подслой и переходная зона при течении ньютоновских жидкостей занимает, в зависимости от расходной скорости, не более 15 % сечения трубы и уменьшается с увеличением скорости течения. Для случая течения раствора метаупона концентрацией 0,2 % это положение сохраняется в силе, при этом замечено, что безразмерная толщина вязкого подслоя (ее значение в этом случае $\delta_{\text{м.у}}^+ = 8$) несколько увеличивается по сравнению с течением воды ($\delta_{\text{в}}^+ = 5$), а границу переходной зоны, так же как и для ньютоновских жидкостей (в том числе воды), можно определить при координате $y^+ = 30$. Если профиль скорости в переходной зоне и турбулентном ядре описывать принятым для трехслойной модели турбулентного течения в трубе ньютоновских жидкостей уравнением вида $U^+ = A + B$, то в обеих зонах течения значение коэффициента A больше, чем при течении воды. Соответственно меняет свое значение и величина B . При этом значения A и B являются различными для разных чисел Рейнольдса при течении раствора метаупона.

Более существенно отличаются профили скорости при течении раствора метаупона концентрации 0,3 %. Область вязкого подслоя и переходной зоны занимают в этом случае около 60 % сечения потока в независимости от расходной скорости течения (числа Рейнольдса рассчитаны по вязкости растворителя), что является несколько неожиданным результатом. Универсальную координату внешней границы вязкого подслоя для всех трех режимов течения можно определить приблизительно равной 15, что существенно больше как для случая течения

воды, так и для случая течения раствора метаупона концентрации 0,2 %. В переходной зоне для всех трех исследованных режимов течения раствора этой концентрации кривые $U^+ = f(y^+)$ совпали.

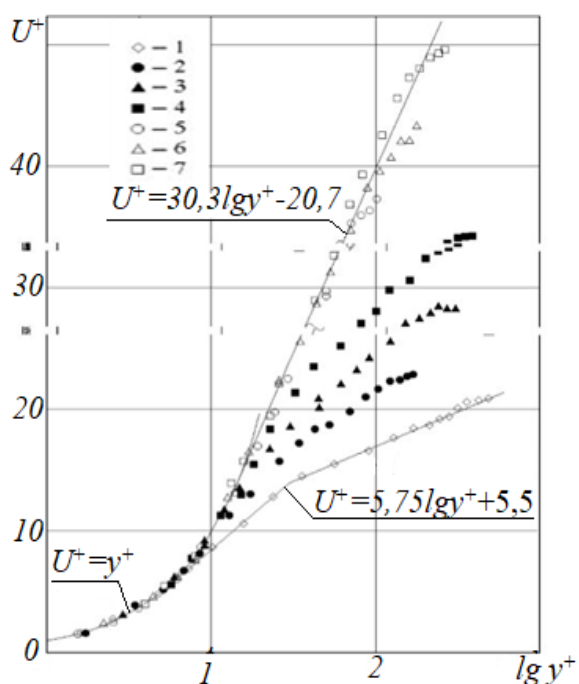


Рисунок 6.3
Безразмерные профили скорости при течениях воды (1) и растворов метаупона концентраций 0,2 % (кривые 2 – 4) и 0,3 % (кривые 5 – 7), числа Рейнольдса равны 10000, 21000 и 37000

Раствор метаупона концентрации 0,3 % обладает максимальным, для данных условий проведения эксперимента, снижением сопротивления трения (рис. 6.3). Математическая обработка совокупности экспериментальных точек для этих трех режимов течения показала, что в переходной зоне течения в универсальных координатах зависимость осредненной скорости течения по сечению потока можно аппроксимировать выражением

$$U^+ = 30.3lgy^+ - 20,7 .$$

За внешнюю границу переходной зоны можно принять координату $y=0,6H$, где H – полувисота канала. В турбулентном ядре профили скорости также описываются логарифмическим уравнением вида

$$U^+ = A_1lgy^+ + B_1 ,$$

где A_1 для всех трех чисел Рейнольдса, при которых проводились исследования, можно принять равным 11,6, а B_1 для каждого режима течения будет иметь свое значение.

6.4. Спектры энергии

Одной из важных характеристик, определяющих структуру турбулентного потока, является плотность энергии пульсаций скорости. В эксперименте можно измерить только спектральные функции по частотам, связанные с соответствующей одномерной спектральной функцией по

волновым числа. Тем не менее одномерный спектр служит достаточно хорошим приближением к трехмерному спектру (исключая область малых волновых чисел), что позволяет получить по нему важную информацию о структуре турбулентного потока.

С помощью лазерного анемометра измерены спектры продольных пульсаций скорости при течении воды и раствора цетилпиридиний хлорида (ЦПХ) в прямоугольном канале сечением 0.04×0.40 , м. Измерения одномерных энергетических спектров продольных пульсаций скорости были проведены в двух точках с координатами $y=2,5$ и 20 мм, которые расположены в переходной зоне (при течении раствора ЦПХ) и в области турбулентного ядра (на оси канала) соответственно. Результаты измерений приведены на рис. 6.4 в виде зависимости нормированной спектральной плотности энергии продольных пульсаций скорости $E^+ = E(k)/\sqrt{u'^2}$ от безразмерного волнового числа $k^+ = kR_r$, где $\sqrt{u'^2}$ – среднеквадратичное значение продольных пульсаций скорости, R_r – гидравлический радиус канала.

Из рис. 6.4 видно, что как при течении воды, так и раствора ЦПХ, можно выделить интервал значений k^+ (инерционный интервал), в котором выполняется «закон 5/3». В то же время спектральные кривые расходятся в области высоких и низких волновых чисел. При этом в области больших значений k^+ кривые для раствора ЦПХ расположены ниже, чем для воды, что свидетельствует о гашении высокочастотных пульсаций скорости. В свою очередь, в области низких волновых чисел спектральная плотность энергии E^+ в растворе ЦПХ выше, чем в воде. Следовательно, в потоке с добавками ЦПХ возрастает относительная доля энергии, содержащейся в движениях большого масштаба.

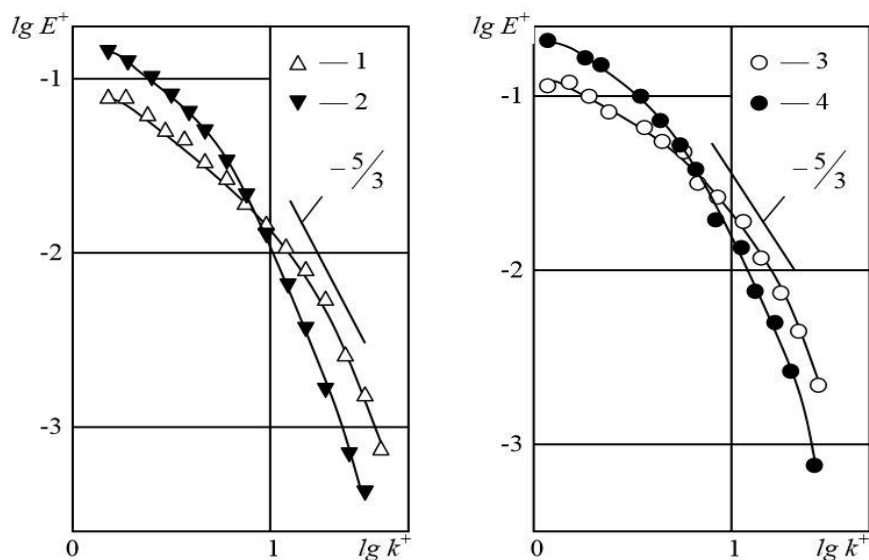


Рисунок 6.4 Спектры продольных пульсаций скорости при течении воды (1, 3) и водного раствора цетилпиридиний хлорида (2, 4) при $y=2,5$ мм (1, 2) и 20 мм (3, 4)

В целом добавки поверхностно-активных веществ приводят к существенному изменению в распределении энергии пульсаций скорости по спектру волновых чисел. Можно предположить, что они как бы «перекрывают» спектральный канал передачи турбулентной энергии в его высокочастотной части путем изменения структуры мелкомасштабной турбулентности. Отметим, что аналогичное воздействие на перестройку энергетического спектра продольных пульсаций скорости оказывают добавки полимеров.

В турбулентном потоке диссипация энергии происходит в вихрях наименьшего размера, когда на движение существенное влияние оказывают силы внутреннего трения (вязкости). Это означает, что энергия, сосредоточенная в высокочастотной части спектра, быстро рассеивается вследствие трения. Скорость этого рассеивания характеризуется средней удельной диссипацией турбулентной энергии ε . Зная ε и предполагая изотропность мелкомасштабных пульсаций скорости, можно определить внутренний (колмогоровский) масштаб турбулентности, совпадающий по порядку своего значения с масштабом наибольших из тех возмущений, на которые вязкость еще оказывает существенное влияние. По опытным данным, с использованием соотношений $\varepsilon = 2\nu \int_0^\infty k^2 E(k) dk$ и $\lambda_0 = \varepsilon^{-1/4} \nu^{3/4}$ была проведена оценка диссипации турбулентной энергии ε и колмогоровского масштаба λ_0 для течений воды и раствора ЦПХ. Рассчитанные значения ε и λ_0 для точек с координатами $y=2,5$ и 20 мм приведены в таблице 6.1:

Таблица 6.1

y, мм	Вода		Раствор ЦПХ	
	$10^4 \cdot \varepsilon$, Дж/кг·с	$10^4 \cdot \lambda_0$, м	$10^4 \cdot \varepsilon$, Дж/кг·с	$10^4 \cdot \lambda_0$, м
1. 2,5	2. 5,16	3. 2,04	4. 4,65	5. 3,90
6. 20	7. 1,48	8. 2,79	9. 0,37	10. 4,14

Анализ результатов расчета значений величин ε и λ_0 показывает, что введение добавок мицеллообразующих поверхностно-активных веществ в турбулентный поток жидкости приводит к уменьшению диссипации турбулентной энергии и возрастанию колмогоровского масштаба турбулентности. Аналогичное влияние на ε и λ_0 оказывают также добавки полимеров.

Таким образом, эффект снижения турбулентного трения в растворах полимеров и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ связан с уменьшением диссипации кинетической энергии пульсационного движения и увеличения средних линейных размеров турбулентных возмущений (вихрей), посредством которых осуществляется диссипация турбулентной энергии в тепло.

6.5. Основные закономерности [257]

Наиболее полные данные по влиянию гидродинамически-активных МПАВ на сопротивление турбулентного трения получены путём изучения течений их мицеллярных растворов в трубах. К основным из них следует отнести следующие:

а) при ламинарном режиме течения в гладкой и шероховатой трубах введение добавок МПАВ, с концентрациями в растворе выше ККМ₂, приводит к увеличению коэффициента гидродинамического сопротивления турбулентного трения (для случаев расчёта числа Рейнольдса (Re) по вязкости воды) и не влияет на его величину, когда число Re рассчитывается по соответствующей вязкости раствора;

б) под воздействием больших гидродинамических напряжений анизометрические мицеллы МПАВ в потоке подвергаются механической деструкции (разрушению), что первоначально приводит к уменьшению величины эффекта снижения сопротивления, а в дальнейшем и к его полному исчезновению; при уменьшении напряжения трения растворы МПАВ полностью восстанавливают свою гидродинамическую эффективность;

в) зависимость величины эффекта снижения ГСТТ от концентрации МПАВ в растворе носит экстремальный характер; при этом максимальный эффект достигается при некоторой его оптимальной концентрации в растворе C_{opt} ; при $C < C_{opt}$ вязкость раствора МПАВ равна или незначительно превышает вязкость растворителя, при $C > C_{opt}$ величина гидродинамического эффекта уменьшается за счёт увеличения вязкости раствора;

г) в шероховатых трубах значительное снижение величины ГСТТ в растворах МПАВ наблюдается лишь в ограниченной области чисел Re ; при дальнейшем их увеличении эффективность воздействия добавок уменьшается;

д) для каждого числа Re , в гладких и шероховатых трубах, существуют предельные значения местных коэффициентов сопротивления турбулентного трения, ниже которых в растворах МПАВ снизить гидродинамическое сопротивление не удаётся; этим предельным значениям соответствует «асимптотический» профиль распределения скоростей с протяжённой переходной областью; предельно-допустимое минимальное гидродинамическое сопротивление трения в трубах, за счёт введения добавок МПАВ, описывается асимптотами; для случаев, когда число Re рассчитывается по вязкости растворителя (воды) в гладких трубах зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ от числа Рейнольдса Re_ν , при максимальном снижении ГСТТ, имеет вид:

$$1/\sqrt{\lambda} = 9,85 \cdot \lg(Re_\nu \sqrt{\lambda}) - 22,1 ,$$

в то же время, когда числа Re рассчитываются по соответствующей каждому сдвиговому напряжению вязкости раствора МПАВ (Re_p), зависимость приобретает вид:

$$1/\sqrt{\lambda} = 8,51 \cdot \lg(Re_p \sqrt{\lambda}) - 13,5 ;$$

е) снижение гидродинамического сопротивления турбулентного трения в напорных трубопроводах сопровождается уменьшением пульсаций давления в турбулентных потоках растворов МПАВ и вибраций труб.

На величину эффекта снижения ГСТТ существенное влияние оказывают температура и солёность растворов.

Специальными исследованиями, на примере натриевых солей лауриновой, миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот, установлена температурная область проявления эффекта снижения ГСТТ, которая находится между кривой, соединяющей соответствующие для используемых МПАВ точки Крафта и кривой для верхних температур, при которых начинают разрушаться анизометрические мицеллы.

Зависимость величины эффекта снижения ГСТТ в растворах анионоактивных МПАВ от концентрации электролитов носит экстремальный характер. При этом, на первой стадии добавки электролитов способствуют образованию анизометрических мицелл, уменьшая ККМ₂; дальнейшее увеличение концентрации солей в растворе приводит к высаливанию МПАВ, которое сопровождается полной потерей раствором свойства обладать сниженным гидродинамическим сопротивлением.

Анионоактивные МПАВ эффективно снижают гидродинамическое сопротивление в щелочных средах. В то же время катионоактивные МПАВ имеют наибольшую эффективность в кислых средах. Амфолитные МПАВ эффективны в нейтральных, кислых и щелочных средах.

6.6. Предполагаемый механизм эффекта [258]

Экспериментальные исследования позволяют выделить общие и отличительные особенности воздействия добавок ПАВ и полимеров на пристенную турбулентность.

Общими особенностями, характеризующими течение растворов МПАВ и полимеров (по отношению к воде), являются: утолщение вязкого подслоя; возникновение упругих напряжений и существование запасенной упругой энергии; уменьшение турбулентного трения; усиление асимметрии в распределении плотности вероятности продольных пульсаций скорости вблизи стенки; снижение спектральной плотности турбулентной энергии в области больших волновых чисел.

Отличительные особенности: в растворах МПАВ (по сравнению с полимерными) существенно снижается интенсивность продольных

пульсаций скорости; в потоках с добавками ПАВ анизотропия турбулентных пульсаций скорости значительно меньше.

С целью интерпретации отмеченных особенностей рассмотрим возможный физический механизм возникновения упругости и снижения турбулентного трения в потоках с добавками МПАВ.

Как отмечено выше, эффект снижения турбулентного трения в растворах МПАВ проявляется при концентрации $C_g \approx \text{ККМ}_2$. Эта концентрация соответствует образованию в растворе анизометрических мицелл, которые представляют собой до некоторой степени гибкий цилиндр с полусферами на концах. Например, в водном растворе смеси ЦПХ ($C_g = 0,007$ моль/л) и α -нафтола ($C_g = 0,006$ моль/л) при $T = 30^\circ\text{C}$ и $pH = 2,05$ образуются цилиндрические мицеллы диаметром $4,4$ нм и длиной $27,7$ нм. Полученные оценки показывают, что линейные размеры мицелл МПАВ в среднем на порядок меньше квадратичных размеров макромолекулярных клубков, которые в отсутствие градиента скорости составляют $200-500$ нм.

В принципе можно предположить, что аналогично полимерным молекулам цилиндрические мицеллы ориентируются в потоке и запасают упругую энергию. Однако результаты расчетов показывают, что в этом случае для мицеллы длиной 20 нм время релаксации составляет всего лишь $\sim 10^{-5}$ с. Это время очень мало, чтобы могло объяснить наблюдаемую в опытах вязкоупругость в растворах МПАВ.

С другой стороны, среднее время релаксации полимерных растворов, в которых проявляется эффект снижения гидродинамического сопротивления, имеет порядок 10^{-3} с, что соизмеримо по порядку с характерным временем диссипативных вихрей. Очевидно, что и в растворах МПАВ, снижающих турбулентное трение, время релаксации должно быть такого же порядка или выше. Рассмотрим предполагаемый механизм формирования вязкоупругих свойств в растворах МПАВ. Необходимым условием для проявления вязкоупругих свойств является образование в коллоидном растворе, содержащем цилиндрические мицеллы, периодической коллоидной структуры (ПКС).

О существовании периодических структур свидетельствуют зафиксированные с помощью ЯМР дальнедействующие пространственные корреляции в растворах МПАВ. Кроме этого, исследования линейного дихроизма, индуцированного сдвигом, позволили установить, что растворы МПАВ имеют «память», которая может длиться в течении секунд. Это, в свою очередь, также подразумевает наличие дальнедействующего порядка в растворах МПАВ.

Периодические коллоидные структуры (ПКС) представляют системы, которые по своим физико-механическим свойствам являются промежуточными между идеально упругими телами и ньютоновскими жидкостями. Иначе их называют ультраслабыми твердыми телами. Свойства этих структур сильно зависят от формы, размеров и взаимного

положения частиц, а также от толщины разделяющих их жидких прослоек. Это определяется природой действующих в дисперсной системе сил и, соответственно, их величиной, которая зависит от расстояния между частицами и их геометрических параметров.

Количественная теория устойчивости дисперсных систем была разработана группой ученых под руководством акад. Л.Д.Ландау. Основу этой теории составляет учет ван-дер-ваальсовых сил притяжения между частицами и электростатического отталкивания двойных электрических слоев этих частиц при их перекрытии. В соответствии с этой теорией в первом приближении можно считать, что положительная энергия электростатического отталкивания частиц U_r с увеличением расстояния уменьшается по экспоненциальному закону, а отрицательная энергия притяжения U_a (в основном определяемая дисперсионными силами) обратнопропорциональна квадрату расстояния (рис. 6.5). В результате на малых и больших расстояниях между частицами преобладает энергия притяжения, а на средних расстояниях – энергия электростатического отталкивания. Первичный минимум U_{min} на потенциальной кривой суммарной энергии взаимодействия частиц отвечает непосредственному слипанию частиц, а вторичный U_{min} – их притяжению через прослойку дисперсионной среды. Максимум на средних расстояниях характеризует потенциальный барьер, препятствующий слипанию частиц. Силы взаимодействия между частицами в дисперсных системах могут распространяться на расстояния до сотен нанометров.

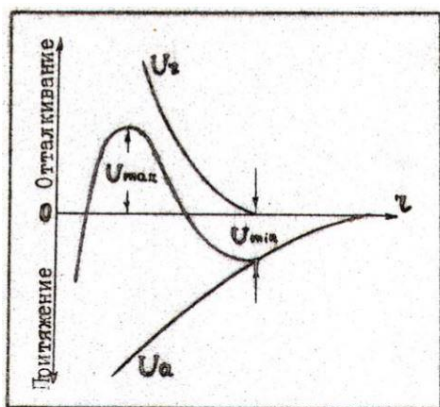


Рисунок 6.5 Потенциальная кривая взаимодействия двух частиц (мицелл): U_{max} — высота потенциального барьера отталкивания; U_{min} — вторичный потенциальный минимум [258]

При определенных условиях потенциальная кривая взаимодействия двух частиц имеет достаточно высокий потенциальный барьер и глубокий вторичный минимум. Такое состояние системы может привести к взаимной фиксации частиц. Если в системе распределение минимумов потенциальной (свободной) энергии будет регулярным, то из монодисперсных коллоидных частиц, находящихся в этих минимумах и разделенных барьером отталкивания, образуется периодическая коллоидная структура, обладающая квазикристаллической решеткой. При относительно малых концентрациях частиц образуются локальные ПКС (рис. 6.6). В этом случае

дальняя агрегация частиц определяется их фиксацией во вторичном потенциальном минимуме вследствие действия на больших расстояниях сил притяжения. Отметим, что с точки зрения жидкокристаллического состояния вещества периодические коллоидные структуры, возникающие в растворах МПАВ, представляют собой лиотропные кристаллы (ультраслабые твердые тела).

Таким образом, на основе приведенного анализа можно высказать гипотезу о том, что эффект снижения турбулентного трения в растворах ПАВ связан с возникновением в них локальных периодических коллоидных структур.

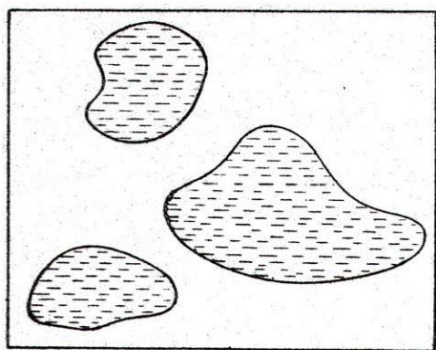


Рисунок 6.6 Схема взаимной фиксации мицелл в локальных периодических структурах растворов МПАВ [258]

Концепция ПКС позволяет объяснить опытные данные по турбулентной структуре течений с добавками МПАВ. Возникновение упругих напряжений и существование запасенной упругой энергии при течении растворов МПАВ обусловлено деформацией квазикристаллических решеток ПКС в сдвиговом потоке. Поскольку локальные ПКС имеют незначительную степень асимметрии, то действие гидродинамических сил потока будет сводиться лишь к деформации структур без сколь-нибудь заметного ориентационного эффекта. В силу этого упругие ПКС будут оказывать демпфирующее действие как на поперечную, так и на продольную составляющие пульсационной скорости. Одновременное гашение указанных составляющих и приводит к тому, что анизотропия турбулентных пульсаций скорости в растворах МПАВ, по сравнению с полимерными, значительно меньше.

Раздел 7. Турбулентное трение в водных растворах смесей гидродинамически-активных полимеров и МПАВ [259]

7.1. Перспективы применения смесей ГДАД для снижения ГСТТ

В разделе 3 (см. п. 3.4) настоящей монографии уже отмечалось, что в качестве снижающих ГСТТ добавок могут использоваться растворимые высокомолекулярные полимеры (синтетические и природные), некоторые мицеллообразующие поверхностно-активные вещества, а также твердые асимметрические частицы (торф, минералы, отвердевшие частицы транспортируемой жидкости, кристаллогидраты, природные и искусственные волокна и др.). Для снижения ГСТТ нефтепродуктов целесообразно использовать асфальтены и нефтяные смолы. В тоже время следует отметить, что ни одна из перечисленных выше добавок не может по отдельности эффективно использоваться для снижения ГСТТ различных жидкостей в широком диапазоне температур и чисел Рейнольдса.

В связи с вышеизложенным особый интерес представляют исследования комплекса добавок, т.е. композиций на основе смесей ГДАД. К большому сожалению, на сегодняшний день опубликовано ограниченное число работ, посвященных этой проблеме. Среди известных работ заслуживают внимания научные публикации В.Н. Пилипенко и В.В. Чернюка, в которых приведены результаты исследований по совместному использованию растворимых ВМП с нерастворимыми искусственными и асбестовыми волокнами, которые хорошо диспергированы в транспортируемой жидкости и имеют равную с ней плотность.

Применение таких смесей позволяет существенно повысить устойчивость к механической деструкции макромолекул дорогостоящего ВМП. Кроме этого, совместное использование волокон и полимеров позволяет снизить ГСТТ жидкостей в напорных трубопроводах на 90...95 %. Предварительные исследования показали, что полимер-асбестовые композиции могут эффективно применяться для снижения гидравлических потерь при гидротранспорте сыпучих материалов.

7.2. Деструкция в мицеллярных растворах ПАВ [7]

Экспериментальные исследования механической деструкции в растворах МПАВ проводили на гидродинамическом стенде, представляющем собой замкнутый контур общей длиной 130 м, собранный из стальных труб с естественной шероховатостью, диаметром 95 мм, и включающем следующие элементы: бак с исследуемой жидкостью, центробежный насос, теплообменники. Расход жидкости изменялся с помощью задвижки, установленной на выходе из насоса. Потери давления

на прямолинейных участках и в системе в целом определяли с помощью дифференциальных и образцового манометров.

На рис. 7.1 а, б приведены результаты исследования механической деструкции при различных температурах в водном растворе метаупона с концентрацией $C = 1,85\% \text{ вес.}$

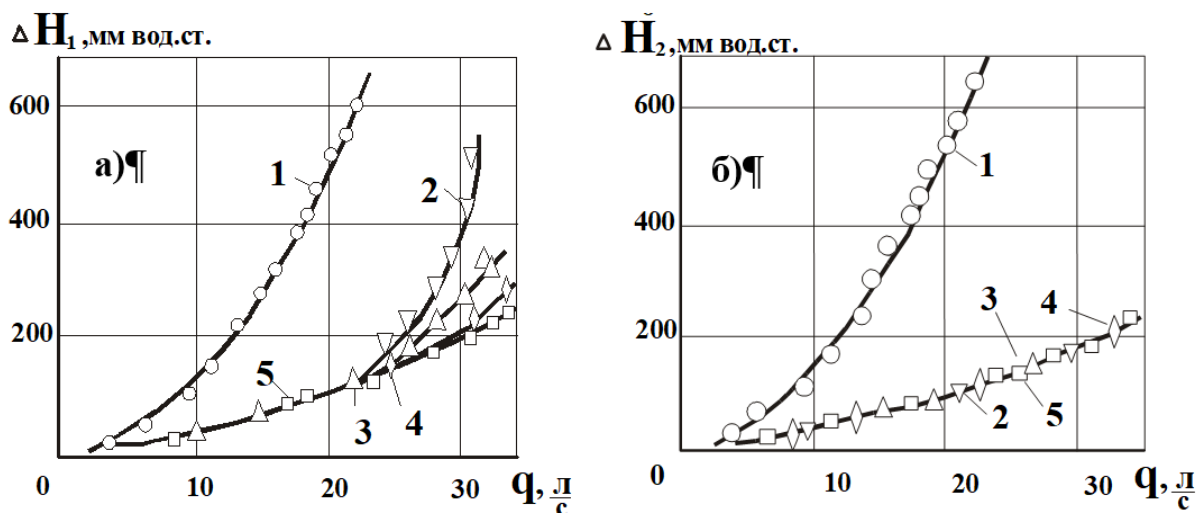


Рисунок 7.1 а, б. Зависимость потерь напора ΔH_1 , ΔH_2 на прямых участках трубы диаметром 95 мм и длиной 5 м, расположенных от насоса на расстоянии 23 м (а) и 95 м (б) от расхода водно-солевого раствора метаупона q , л/с. Концентрация метаупона и хлористого натрия в растворе 1,85 % вес. и 7,8 % вес. соответственно.

1 – вода, кривые 2,3,4,5 – температура растворов 2,3; 3,5; 11,0 и 13,0°C.

По оси абсцисс отложен расход жидкости q по оси ординат – потери напора ΔH_1 и ΔH_2 , измеренные на участках длиной 5 м на расстоянии 23 м и 95 м от выхода из насоса, соответственно. Видно, что при данной концентрации метаупона, которая значительно превышает оптимальную, гидродинамическая эффективность раствора на расстоянии 95 м от насоса практически не зависит от температуры (все экспериментальные точки группируются возле одной кривой). Следует также отметить, что скорость восстановления мицеллярных структур при расходах $q < 20 \text{ л/с}$ не зависит от температуры раствора. При $q > 20 \text{ л/с}$ скорость восстановления мицелл уменьшается при понижении температуры, что и приводит к расслоению экспериментальных кривых $\Delta H_1 = \Delta H_1(q)$.

В работах Повха И.Л., Ступина А.Б. и др. приведены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости коэффициента момента гидродинамического сопротивления трения C_m от числа Рейнольдса Re при течении водно-солевых растворов гидродинамически-активных промышленных паст – диталана OTS и метаупона в зазоре между коаксиальными цилиндрами, т.е. в условиях, позволяющих в течение длительного времени поддерживать определенные напряжения трения на стенке вращающегося цилиндра. При этом в качестве

электролита – способствующего мицеллообразованию в растворах поверхностно-активных веществ был использован хлористый натрий, содержание которого в растворах диталана OTS и метаупона было равно 3,0 % *вес.* и 8,0 % *вес.* соответственно.

Экспериментальные исследования проводились на установке, представляющей собой стакан из нержавеющей стали, который посредством электродвигателя постоянного тока приводился во вращение с возможностью проводить измерения при выбранных (фиксированных) числах оборотов. Внутри стакана на расстоянии 1 мм друг от друга были установлены три цилиндра. Верхний и нижний цилиндры устанавливаются неподвижно с целью устранения краевых эффектов. Средний цилиндр может поворачиваться на 120°, а возникающий на нем в результате вращения внешнего цилиндра момент M передается на датчик силы, по показателям которого рассчитывалась величина коэффициента момента сопротивления C_m по формуле:

$$C_m = \frac{\tau}{\rho \vartheta^2} = \frac{M}{\rho \omega^2} \cdot \frac{1}{2\pi R^4 H} .$$

Здесь τ – напряжение трения на среднем цилиндре, n/m^2 , ϑ – скорость вращения наружного цилиндра (стакана), m/c ; ρ – плотность исследуемой жидкости, kg/m^3 ; ω – частота вращения цилиндра, c^{-1} ; H – высота среднего (неподвижного) цилиндра; R – внутренний радиус вращающегося цилиндра.

Число Рейнольдса определялось из соотношения:

$$Re = \frac{\vartheta \delta}{\nu} = \omega R \cdot \frac{\delta}{\nu} ,$$

где δ – зазор между неподвижными и вращающимися цилиндрами, m ; ν – вязкость исследуемой жидкости.

На рис. 7.2 в качестве примера приведены зависимости коэффициента момента сопротивления от числа Re , рассчитанного по вязкости воды для растворов диталана OTS разных концентраций в 3 %-ом водном растворе хлористого натрия [260].

Кривые *a* и *б* соответствуют зависимости $C_m = f(Re)$ при течении воды в зазоре между коаксиальными цилиндрами относительной ширины $\delta/R = 0.028$, полученной Дж. И. Тейлором. Видно, что коэффициент момента сопротивления для растворов концентрации $C = 1.2; 2.4 \%$ (кривые 4 и 5 соответственно) снижение сопротивления начинает проявляться при числах Рейнольдса 6000 и 9000. Однако эти растворы, в отличие от растворов, содержащих 0,3 и 0,6 % *вес.* диталана OTS, обладают сниженным ГСТТ при значительно больших сдвиговых напряжениях (числах Re).

Аналогичные исследования были проведены с растворами метаупона. Характер кривых зависимости $C_m = f(Re)$ для его водных растворов такой же, как и для диталана OTS. Однако добавки метаупона более эффективны

при больших сдвиговых напряжениях. Это позволяет предположить, что структурно-механические свойства растворов ПАВ, а, следовательно, и их гидродинамическая эффективность существенно зависят не только от концентрации вводимой добавки, но и от строения углеводородного радикала молекулы поверхностно-активного вещества.

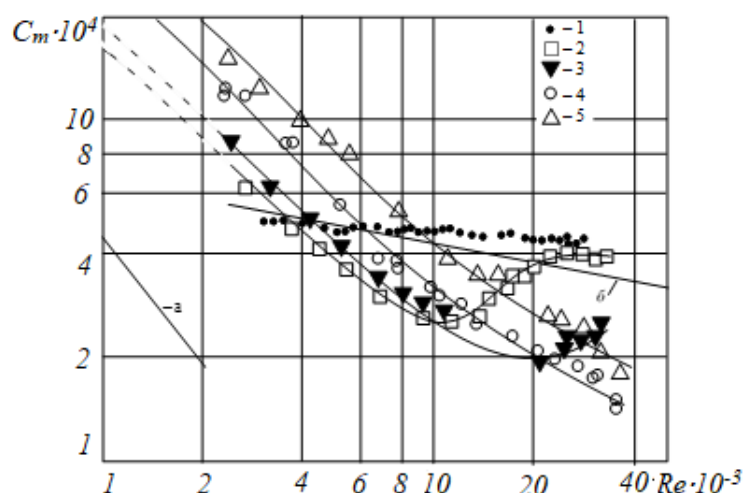


Рисунок 7.2 Зависимость коэффициента момента ГСТТ от числа Рейнольдса для воды – кривая 1, и водных растворов, содержащих 0,3; 0,6; 1,2; 2,4 % *вес.* диталана OTS (кривые 2-5 соответственно). Данные работы [260]

7.3. Снижение ГСТТ в растворах смесей

В работах Повха И.Л. и др. проведены экспериментальные исследования по влиянию концентрации анионных ПАВ на величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления в водных растворах ПЭО и ПАА, а также стабильность (устойчивость к механической деструкции) растворов этих полимеров в турбулентном потоке [261].

В качестве поверхностно-активных веществ были использованы ПАВ «Прогресс» марки 20, содержащим 20 % натриевой соли вторичных алкилсульфатов и натрия додецилсульфат (НДДС) марки «Ч».

Результаты экспериментальных исследований показали, что введение в водный раствор ПЭО 3 % *вес.* ПАВ «Прогресс» (соответствует содержанию этого вещества в системах пенного пожаротушения) приводит к повышению гидродинамической эффективности полимерных растворов во всем диапазоне чисел Рейнольдса. При этом величина критического числа Re смещается в сторону меньших значений.

В растворах смеси гидролизованного ПАА (со степенью гидролиза 16 %) и ПАВ «Прогресс» коэффициент гидродинамического сопротивления трения больше, чем у раствора полимера без ПАВ.

Установлено, с учетом степени ионизации и ζ – потенциала мицелл, установлено, что повышенной гидродинамической эффективностью обладают гидрофобные комплексы ПЭО с мицеллами ПАВ.

Кроме этого, следует отметить, что добавки анионных ПАВ, в количестве, равном или больше первой критической концентрации мицеллообразования ($ККМ_1$), увеличивают гидродинамическую эффективность ПЭО и уменьшают эффективность гидролизованного ПАА примерно на 10%. В растворах негидролизованного ПАА величина эффекта снижения турбулентного трения не зависит от концентрации ПАВ.

Анионные ПАВ повышают устойчивость растворов ПЭО и негидролизованного ПАА к механической деструкции и не влияют на стабильность растворов гидролизованного ПАА.

В работах Повха И.Л., Ступина А.Б. и др. приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию смесей гидродинамически-активных высокомолекулярного полимера – ПАА и МПАВ – промышленной пасты метаупон на величину снижения коэффициента момента ГСТТ в зазоре между коаксиальными цилиндрами. Исследования проводились в широких диапазонах концентраций ПАА и метаупона в смеси при числах Рейнольдса от 6000 до 40000 [262].

В ходе проведения исследований установлены особенности снижения ГСТТ в смесях, к которым в первую очередь следует отнести расширение температурного диапазона и диапазона чисел Рейнольдса, в которых проявляется эффект. При этом следует отметить, что в растворах смеси, содержащих МПАВ (метаупон) с концентрациями выше второй критической концентрации мицеллообразования ($ККМ_2$), в значительной мере уменьшается механическая деструкция макромолекул ПАА.

На рис. 7.3 в качестве примера приведены кривые зависимости коэффициента момента гидродинамического сопротивления трения от числа Рейнольдса для воды, водных растворов ПАА, метаупона и смеси «ПАА+метаупон». С целью уменьшения $КММ_2$ в растворы, содержащие метаупон, дополнительно вводился хлористый натрий – 6,8% вес.

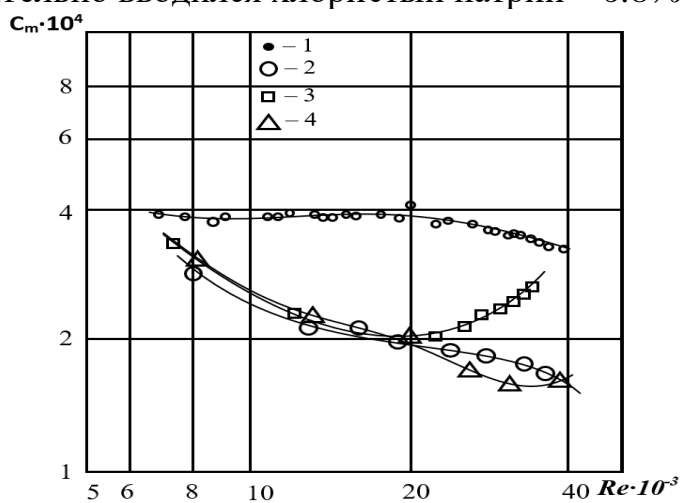


Рисунок 7.3 Зависимость коэффициента момента ГСТТ от числа Рейнольдса для воды – кривая 1, водного 10^{-4} г/см³ раствора ПАА – кривая 2; водного 0,3 % вес. метаупона – кривая 3; смеси «ПАА – метаупон» – кривая 4. Концентрация хлористого натрия в 3,4÷6,8 % вес. Данные работы [262]

7.4. Профили скорости и интенсивность турбулентности

Измерения полей скоростей и среднеквадратичных значений продольной составляющей пульсаций скорости были проведены на гидродинамическом стенде замкнутого типа с применением однокомпонентного лазерного измерителя скорости. Турбулентное течение исследуемых жидкостей реализовывалось в изготовленном из оргстекла рабочем канале квадратного сечения со стороной $0,04$ м. Сечение, в котором проводили измерения полей скоростей, находилось на расстоянии 100 калибров от входа в канал. В качестве добавок использовали полимер – полиакриламид и поверхностно-активное вещество – техническую пасту «метаупон».

Исследования были проведены в следующей последовательности. Первоначально были проведены измерения при течении раствора метаупона (МУ) концентрацией $0,2$ %, содержащего 7 % *вес.* хлористого натрия. После тщательной промывки экспериментальной установки были проведены исследования течения раствора полиакриламида (ПАА) концентрации $0,009$ %. При рабочей расходной скорости раствор полимера циркулировал до стабилизации его гидродинамической эффективности. В начале опыта эффект снижения трения был близок к 80 %, через некоторое время, вследствие деструкции макромолекул полимера, эффективность раствора снизилась до 20 - 25 % и в дальнейшем, при проведении эксперимента не изменялась. После этого были измерены профили скорости и интенсивности продольных пульсаций скорости. На следующем этапе эксперимента в этот раствор полимера был введен метаупон до концентрации $0,2$ % *вес.* и хлористый натрий (концентрация 7 % *вес.*). Все измерения проводились при постоянной расходной скорости, которой соответствовало число Рейнольдса равное 26000 , и температуре растворов 20 °С. В процессе проведения измерений значения величин снижения гидродинамического сопротивления трения составляли: $(\Delta\lambda/\lambda)_{ПАА}=22$ % для течения раствора полиакриламида, $(\Delta\lambda/\lambda)_{МУ}=37$ % для течения раствора метаупона, а для течения раствора смеси этих веществ $(\Delta\lambda/\lambda)_{смесь}=70$ %.

На рис. 7.4 представлены профили скорости для течения воды, раствора ПАА, метаупона и их смеси.

Из рисунка видно, что в турбулентном ядре для всех трех исследованных течений профиль скорости можно описать логарифмической формулой $U^+ = A \cdot \lg y^+ + B$, где коэффициент A определялся наклоном зависимости U^+ от y^+ . Значение коэффициента A при течении раствора ПАА увеличивается. Этот результат для растворов поверхностно-активных веществ согласуется с результатами других исследований. Для течения растворов полимеров изменение значения коэффициента A , по сравнению с его значением для течения ньютоновских жидкостей, до сих пор является спорным – отмечены как его увеличение,

так и равенство значению при течении ньютоновской жидкости. Для течения раствора смеси «полиакриламид-метаупон» измерения показали, что зона турбулентного ядра занимает много меньшую, по сравнению с течениями однородных растворов, часть сечения потока, а значение коэффициента A осталось, в пределах погрешности эксперимента, таким же, как и при течении чистого растворителя.

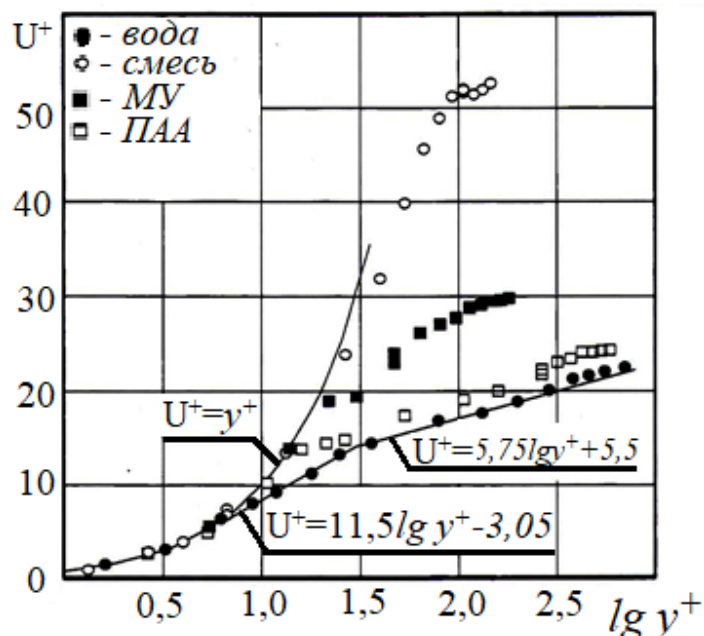


Рисунок 7.4 Профили скорости для течения растворов ПАА, метаупона и их смеси. Данные работы [256]

На рис. 7.5 представлены распределения по сечению потока среднеквадратичных значений продольных пульсаций скорости, нормированных по динамической скорости U^* . Считается, что при течении растворов полимеров максимальная величина среднеквадратичных значений продольных пульсаций, по крайней мере, не меньше соответствующих при течении ньютоновской жидкости. В работах Ступина А.Б. и др. установлено, что максимальные среднеквадратичные значения продольных пульсаций скорости при течении однородных растворов полимера и метаупона, меньше соответствующих значений для течения чистого растворителя – воды. Однако следует отметить, что при течении раствора полимера наибольшее значение продольных пульсаций скорости несколько больше, чем при течении раствора метаупона. В остальном распределения этих величин для течения растворов полимера и ПАВ имеют традиционный для них характер – сдвиг максимума пульсаций на большее расстояние от стенки и размывание по сечению потока зоны, в которой наблюдаются наибольшие значения продольных пульсаций скорости. В области турбулентного ядра добавки полимеров и поверхностно-активных веществ не влияют на величину среднеквадратичных значений продольных пульсаций скорости.

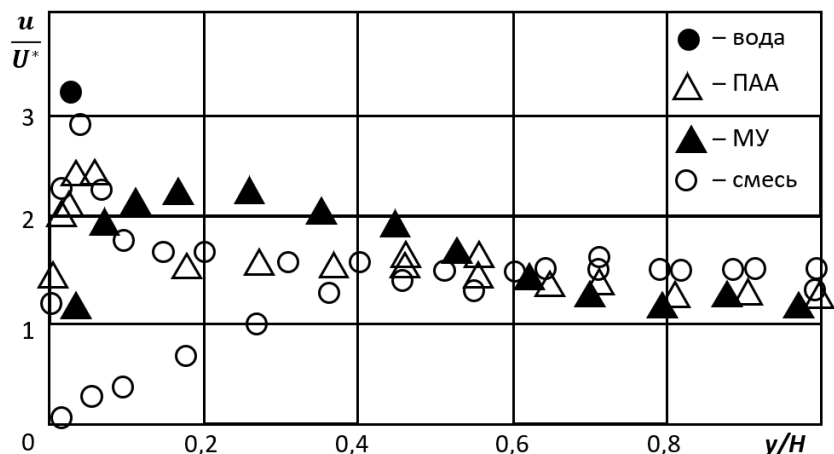


Рисунок 7.5 Распределения по сечению потока среднеквадратичных значений продольных пульсаций скорости, нормированных по динамической скорости U^* .

В случае течения раствора смеси «полиакриламид-метаупон» это распределение среднеквадратичных значений пульсаций носит иной характер. В этом случае происходит очень сильное снижение продольных пульсаций, особенно в пристенной области течения. Максимум продольных пульсаций скорости в этом случае выражен очень слабо и отодвинут от стенки в центральную область течения.

Столь сильное уменьшение продольных пульсаций скорости позволяет высказать предположение о том, что в растворе смеси «полимер-ПАВ» происходит объединение в пространственные структуры макромолекул полимера и мицелл поверхностно-активного вещества, которые являются более устойчивыми к воздействию гидродинамического поля, чем пространственные структуры, возникающие в растворах составных компонентов смеси по отдельности.

Исследования турбулентных течений смеси гидродинамически-активных полимеров и МПАВ показали:

- а) повышение гидродинамической эффективности в водных растворах смеси ПЭО и анионных ПАВ обеспечивается за счёт образования гидрофобных комплексов из макромолекул полимера с мицеллами ПАВ;
- б) добавки анионных ПАВ, в количествах равных или больше первой критической концентрации мицеллообразования, увеличивают гидродинамическую эффективность ПЭО и уменьшают эффективность гидролизованного ПАА в водных растворах примерно на 10 %;
- в) анионные ПАВ повышают устойчивость к механической деструкции растворов ПЭО и негидролизованного ПАА и не влияют на стабильность растворов гидролизованного ПАА;
- г) добавки смеси «полимер+МПАВ» приводят к существенному перераспределению осредненной и пульсационной скоростей, что воздействует на турбулентность потока в значительно большей степени, чем полимеры или ПАВ по отдельности друг от друга.

Раздел 8. Практическое использование эффекта снижения турбулентного трения ГДАД

8.1. Возможные варианты эффективного использования эффекта [7]

Одним из резервов повышения эффективности работы гидравлических систем является использование явления снижения гидродинамического сопротивления трения за счет ввода в перекачиваемые жидкости микродобавок высокомолекулярных полимеров, мицеллообразующих поверхностно-активных веществ, их смесей, а также растворимых полимерных композиций на их основе.

Многочисленными исследованиями установлено, что за счет введения в турбулентный поток жидкости ($5 \div 50$) г/м³ высокомолекулярных полимеров (полиэтиленоксида, полиакриламида и т.д.) с молекулярной массой $(2,5 \div 6,0) \cdot 10^6$, а также некоторых гидродинамически-активных МПАВ можно существенно (на $50 \div 80\%$) снизить сопротивление трения в трубах промышленных диаметров ($50 \div 400$ мм). При этом появляется возможность повысить эффективность работы гидравлических систем по ряду показателей: снижение потребляемой перекачивающими насосами мощности, увеличение длины прямолинейных участков трубопровода, применение труб меньшего диаметра, а также увеличение расхода подаваемой жидкости.

Так, например, с точки зрения практического применения добавок полимеров в гидравлических системах аварийного водоотлива и пожаротушения интерес представляет увеличение расхода перекачиваемой жидкости. Согласно формуле Дарси-Вейсбаха [17] потери напора на трение ΔH при течении жидкости по напорному трубопроводу определяется из выражения:

$$\Delta H = \frac{\lambda l V^2}{d 2g}, \quad (8.1)$$

где λ – коэффициент гидродинамического сопротивления; l , d – длина и гидравлический диаметр трубопровода соответственно; g – ускорение свободного падения; V – расходная скорость течения жидкости в трубопроводе. Исходя из этой формулы, при постоянном напоре, для относительного изменения расхода жидкости легко получить выражение:

$$V_n/V_0 = \sqrt{\lambda_0/\lambda_n}. \quad (8.2)$$

Здесь и дальше индексы «0» и «n» - относятся к режимам перекачки чистых жидкостей (растворителей) и жидкостей с добавками, снижающими гидродинамическое сопротивление.

Из выражения (8.2) видно, что вызываемое введением гидродинамически активных добавок уменьшение коэффициента гидродинамического сопротивления (снижение потерь на трение) приводит

к увеличению расхода скорости, т.е. к возрастанию пропускной способности трубопровода

При снижении потерь на трение вдвое можно увеличить расход жидкости по трубопроводу в 1,4 раза. Для случая, когда коэффициент гидродинамического сопротивления уменьшается в 5 раз (случай максимально-возможного снижения гидродинамического сопротивления) – расход жидкости с гидродинамически активными добавками увеличивается в 2,24 раза по сравнению с чистым растворителем.

В ряде случаев возникает необходимость снизить энергоемкость гидравлической системы. Исходя из уравнения (8.1) следует, что относительное снижение потребляемой мощности (при фиксированных расходе жидкости, диаметре и длине трубопровода) будет определяться выражением:

$$\frac{N_0}{N_n} = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} . \quad (8.3)$$

Часто при реконструкции гидравлических систем возникает необходимость увеличить длину трубопроводов при сохранении их диаметра. Это может быть связано, например, с увеличением протяженности выработок в угольных шахтах, где проложены трубопроводы систем водоотлива, а также подсоединением новых потребителей к системам канализации. Снижение гидродинамического сопротивления, как это следует из формулы (8.1) позволяет при неизменной затрачиваемой мощности, постоянном расходе жидкости по трубопроводу и таком же диаметре получить относительное увеличение длины из следующего выражения:

$$\frac{l_n}{l_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} . \quad (8.4)$$

Видно, что при уменьшении коэффициента ГСТТ в 5 раз можно (без изменения конструкции гидравлической системы и введения дополнительных мощностей) во столько же раз увеличить протяженность прямолинейных участков трубопроводов при сохранении других параметров, характеризующих гидравлическую систему.

Особого внимания заслуживает случай возможного уменьшения диаметра трубопровода при фиксированных: расходе жидкости, потребляемой мощности и длине трубопровода. Это преимущество может быть использовано при строительстве новых трубопроводных систем или замене старых труб. Для относительного уменьшения диаметра трубопровода, исходя из формул (8.1) и (8.2), легко получить следующую зависимость:

$$d_n/d_0 = \sqrt[5]{\lambda_0/\lambda_n} . \quad (8.5)$$

Видно, что снижение ГСТТ, например в 2 раза, допускает уменьшение внутреннего диаметра трубопровода на 13 %. Это позволяет за счет снижения металлоемкости труб, уменьшенных затрат на их монтаж получить значительный экономический эффект.

В табл. 8.1 приведены варианты эффективного использования гидродинамически-активных добавок в напорных трубопроводах для различных величин эффекта снижения ГСТТ в напорных трубопроводах.

Таблица 8.1

Варианты возможного использования явления снижения ГСТТ

№ п/п	Величина эффекта сниж. сопротивления, %	Увеличение длины трубопроводов, кол-во раз	Уменьшение внутреннего диаметра труб, %	Увеличение расхода жидкости, кол-во раз	Уменьшение потребляемой насосом мощности на перекачку, %
1.	10	1,11	2	1,05	10
2.	20	1,25	4	1,12	20
3.	30	1,43	7	1,20	30
4.	40	1,43	10	1,29	40
5.	50	2,0	13	1,41	50
6.	60	2,5	17	1,58	60
7.	70	3,33	21	1,82	70
8.	80	5	28	2,24	80

8.2. Гидродинамически-активные композиции.

8.2.1. Композиции на основе ВМП [7]

В таблице 8.2 приведен перечень известных и разработанных в Донецком национальном университете (ДонНУ), полимерных материалов, которые могут использоваться в виде: однородных концентрированных растворов, приготовленных по классической схеме; высококонцентрированных полимерных гелей; жидких водорастворимых полимерных композиций – ЖВПК (равноплотных тонкодисперсных суспензий, тонкодисперсных паст, жидких композиций с повышенным содержанием полимера); твердых водорастворимых полимерных композиций – ТВПК (ультраслабых, легкорастворимых в воде полимерных покрытий, которые получают путем нагревания полимерных суспензий в литьевых формах или нанесением на омываемую твердую поверхность движущегося в воде объекта, а также на армирующие вставки проточного генератора приготовления растворов, лакокрасочных материалов; флоковых покрытий с водорастворимыми полимерными наполнителями) и твердых брикетов, которые готовят путем холодного прессования смеси тонкодисперсного порошка и наполнителя.

В колонках 3,4 табл. 8.2 приведены условные обозначения этих композиций и содержание в них полимера, в вес. %.

Таблица 8.2

Водорастворимые полимерные композиции для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения

№ п/п	Наименование полимерного материала (композиции)	Условное сокращение названия композиции	Содержание полимера, % вес.
<i>Однородные растворы и полимерные гели</i>			
1	Однородные концентрированные растворы полимеров, приготовленные по классической схеме	ОКПР	0,05-1,0
2	Высококонцентрированные полимерные гели	ВКПГ	до 8,0
<i>Жидкие водорастворимые полимерные композиции (ЖВПК)</i>			
3	Равноплотные тонкодисперсные полимерные суспензии и эмульсии	РТПС РТПЭ	до 15,0
4	Тонкодисперсные водорастворимые полимерные пасты	ТВПП	до 34,0
5	Жидкие композиции (суспензии) с повышенным содержанием полимера	ЖКПП	35,0-60,0
<i>Твердые водорастворимые полимерные композиции (ТВПК). Полимерные покрытия</i>			
6	Ультраслабые полимерные покрытия, приготовленные нанесением лакокрасочных материалов	УПП (ЛКМ)	30,0-65,0
7	Ультраслабые полимерные покрытия на армирующих вставках, приготовленные нагреванием полимерных суспензий	УПП (НПС)	30,0-60,0
8	Флоковые покрытия с водорастворимым полимерным наполнителем	ФПП (ВН)	25,0-30,0
<i>Полимерные брикеты</i>			
9	Твердые водорастворимые полимерные композиции – брикеты, приготовленные путем холодного прессования смеси тонкодисперсного полимерного порошка и наполнителя	ТВПБ	90,0-95,0

Проведенными исследованиями было установлено, что ЖВПК и генераторы приготовления из них растворов целесообразно использовать в централизованных системах пожаротушения, водоотведения, канализации и т.д., а ТВПК (в составе проточных генераторов приготовления растворов) в мобильных установках водного пожаротушения и аварийной откачки воды и для повышения эффективности работы гидравлических машин, применяемых при разрушении жидкостными струями твердых материалов.

8.2.2. Композиции на основе МПАВ [7]

В табл. 8.3, в качестве примера, приведены составы некоторых гидродинамически-активных композиций на основе МПАВ и веществ, способствующих образованию в их растворах анизометрических мицелл

(электролитов и α -нафтола) для снижения ГСТТ воды. В отличие от высокомолекулярных полимеров растворы МПАВ характеризуются обратимой механической деструкцией. Это позволяет применять их в замкнутых гидравлических системах, например, в системах тепло и холодоснабжения, в водокольцевых насосах для откачки метана в угольных шахтах и т.д.

Таблица 8.3

Составы гидродинамически-активных композиций на основе МПАВ и способствующих мицеллообразованию веществ (СМВ) для снижения ГСТТ воды

№ п/п	Состав композиции (МПАВ+СМВ)	Оптимальные концентрации, % вес.			Величина эффекта снижения ГСТТ при $C_{опт.}, \%$	Температурный диапазон существования эффекта снижения ГСТТ, °С
		МПАВ	СМВ	Суммарная		
1.	Цетилпиридиний хлористый + α -нафтол	0,065	0,025	0,09	75	10-50
2.	Цетилпиридиний бромид + α -нафтол	0,060	0,022	0,082	72	25-90
3.	Метаупон+ NaCl	(0,30-3,6)	(7,5-8,3)	(7,8+11,9)	78	3,5-95
4.	Диталан OTS+NaCl	(0,6-2,4)	3,0	3,6-5,4	67	9,5-55
5.	Тетрадецилсульфат натрия+ NaCl	0,08	1,75	1,83	60	40-65
6.	Олеат натрия+KCl	0,2	6,0	6,2	65	20-50

Разработанные в ДонНУ составы теплоносителя и основного хладоносителя шахтных установок кондиционирования воздуха со сниженным ГСТТ, на основе композиции из МПАВ (метаупона) и СМВ защищены авторскими свидетельствами СССР на изобретения [263,264].

8.3. Перспективы практического применения полимерных композиций

8.3.1. Повышение эффективности работы пожаротушащего оборудования [38,42,44,46,47]

Пожары, как неконтролируемые процессы горения различных материалов, уничтожают значительные материальные ценности, создают угрозу для жизни людей, наносят большой вред окружающей среде. Анализ работы огнетушащего оборудования, применяемого оперативными подразделениями Министерства по чрезвычайным ситуациям, показывает его недостаточную эффективность при тушении крупномасштабных пожаров. В первую очередь это связано с ограниченным количеством подачи пожаротушащих жидкостей в очаг пожара и сравнительно низкой их

огнетушащей способностью. Кроме этого, для эффективного тушения крупномасштабных пожаров необходимо увеличить дальнобойность струй пожаротушащих жидкостей, которые формируются в пожарных стволах, а также уменьшить количество аварийных ситуаций в мобильных установках пожаротушения, которые связаны с разрывами пожарных рукавов.

Проведенные лабораторно-стендовые, полигонные и промышленные испытания показали, что для повышения эффективности использования централизованных систем водного пожаротушения целесообразно использовать ЖВПК (тонкодисперсные суспензии и пасты), а в мобильных установках – ультраслабые покрытия и флоковые покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями в составе проточных генераторов (кассет) приготовления из них растворов, а также твердые полимерные брикеты.

ОКПР на основе ПЭО и ПАА (в т.ч. и их смесей с ПАВ) целесообразно использовать тогда, когда известно, что тушение пожара принимает затяжной характер.

Результаты стендовых и полигонных испытаний показали, что для ввода в трубопроводы и пожарные рукава однородных концентрированных полимерных растворов могут эффективно использоваться пеносмесители ПС-1 и ПС-2, которые широко применяются в противопожарной технике, а при использовании ультраслабых покрытий и флоковых покрытий – проточные кассеты, общий вид одной из которых приведен на рис. 8.1.

Испытания на участке пожарно-оросительного трубопровода шахты им. М.И.Калинина ГП «Донецкуголь» показали, что за счет введения в воду ЖВПК, на основе ПЭО, можно достичь уменьшения гидравлических потерь на 50-70 %. Это позволяет: либо увеличить расход пожаротушащей жидкости по трубопроводу в (1,41-1,82) раза, либо уменьшить для перекачивания жидкости насосами мощность на (50-70) %, либо увеличить прямолинейные участки трубопровода в (2,0-3,3) раза, либо уменьшить внутренний диаметр используемых труб на (13-21) %.

Полигонные испытания проточного генератора с армирующими вставками, на которые были нанесены ультраслабые полимерные покрытия на основе ПЭО, проводились с использованием пожарного автомобиля АЦ совместно с подразделением военизированной пожарной охраны Донецкой железной дороги (г. Ясиноватая, Донецкой обл.).

Результаты испытаний (см. табл. 8.4) показали, что при подаче по рукавной линии длиной 250 м и внутренним диаметром 51 мм за счет введения гидродинамически-активного ПЭО из ультраслабого покрытия, которое размывается в проточной кассете, можно увеличить расход огнетушащей жидкости на 39 %, а дальнобойность струи – на 28 % (по сравнению с водой). При этом гидравлические потери давления в рукавной линии уменьшаются на 17 %. Таким образом, следует ожидать, что при оптимальных условиях применения гидродинамически-активные

полимерные композиции обеспечивают увеличение расхода огнетушащих жидкостей по рукавной линии, которые подаются в очаг пожара, (в 1,5-2,0 раза) и увеличивают дальнобойность струй на 30-40 % [7].

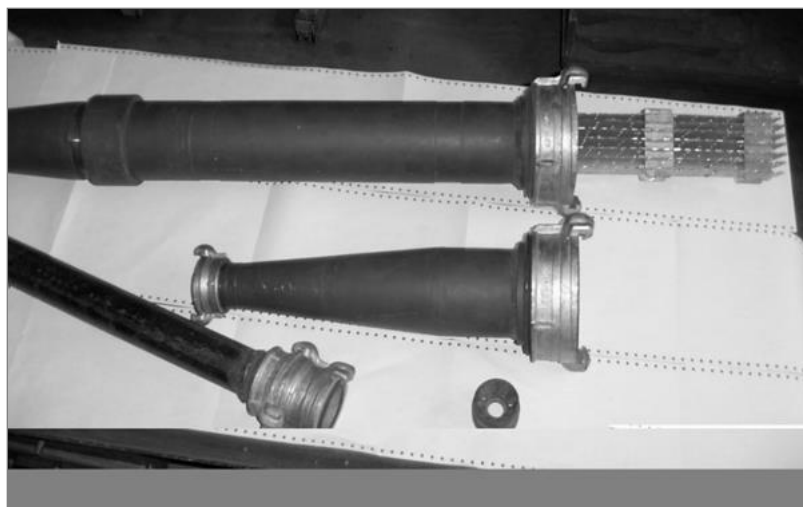


Рисунок 8.1 Общий вид проточной кассеты для приготовления пожаротушащих жидкостей с использованием УПП (НПС) и ФПП (ВН)

Таблица 8.4

Результаты полигонных испытаний пожаротушащих жидкостей

P – давление в начале рукавной линии, Q – расход пожаротушащей жидкости в рукавной линии, L – дальнобойность струи

№ п/п	P , кг/см ²	P_c , кг/см ²	Q , л/с	L , м
Огнетушащая жидкость – вода				
1	2	1,4	1,3	19
2	4	3,0	2,7	21
3	6	4,8	3,3	25
4	8	6,6	4,4	31
Огнетушащая жидкость – водный раствор ТВПК				
5	4	3,0	3,60	27
6	6	5,0	4,55	32
8	8	7,8	4,60	33

Известно, что эффективность тушения пожара в значительной степени зависит от огнетушащих свойств жидкостей. Проведенные полигонные испытания водных растворов полимерных композиций в качестве пожаротушащих жидкостей показали, что при тушении шахтной транспортной ленты, отработанного промышленного масла, поленьев акации, время тушения моделируемых очагов пожара, уменьшается в среднем в 1,6 раза, а количество использованной для этих целей воды – в 1,5 раза.

8.3.2. Снижение гидравлических потерь в напорных трубопроводах систем водоотведения и канализации [265]

В период сильных паводков и ливней часто происходит перенаполнение систем водоотведения и канализации, которые вызывают затопление водой и коммунально-бытовыми стоками территорий промышленных предприятий и жилых массивов. При этом уничтожаются материальные ценности, возникает угроза жизни людям, загрязняется окружающая среда. Важным резервом предотвращения перенаполнения трубопроводных систем канализации и водоотведения может быть использование явления снижения ГСТТ добавками гидродинамически-активных композиций [266,267].

В ряде работ, выполненных у нас в стране и за рубежом, за счет введения в трубопроводы заранее приготовленных однородных растворов высокомолекулярных ПЭО или ПАА показана принципиальная возможность повышения пропускной способности канализационных систем и систем водоотведения. Однако, из-за необходимости использования для приготовления и хранения растворов полимеров громоздкого оборудования и потере ими свойства снижать ГСТТ во времени такой способ оказался малоперспективным.

В ДонНУ были созданы быстрорастворимые ЖВПК, которые в составе специальных генераторов обеспечивают за малые промежутки времени (до 20 секунд) приготовление однородных растворов ПЭО и ПАА с максимальным сохранением их молекулярной массы. Такие ЖВПК с генераторами могут эффективно использоваться для повышения пропускной способности трубопроводов централизованных канализационных систем и систем водоотведения при чрезвычайных ситуациях, т.е. в период так называемых «пиковых нагрузок», вызванных техногенными авариями, большими паводками или ливнями.

В табл. 8.5 приведены результаты лабораторных исследований зависимости величины эффекта снижения ГСТТ $\Delta, \%$ от концентрации ПЭО с молекулярной массой 4,8 млн. (производства НИИ химической технологии, г. Новосибирск, Россия) в шахтной воде (из системы водоотведения шахты им. М.И.Калинина) и в воде из канализационного коллектора г.Донецка [7].

Таблица 8.5

Зависимость величины эффекта снижения ГСТТ $\Delta, \%$ от концентрации ПЭО $C_{ПЭО}, \%$ в шахтной воде (1) и в воде канализационного коллектора (2). Данные получены на турбулентном реометре с диаметром капилляра $d = 1,2 \text{ мм}$ и его длиной $L = 0,5 \text{ м}$. Температура исследуемых растворов $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$.

№ п/п	$C_{ПЭО}, \%$	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}
1	$\Delta, \%$	40	47	52	66	71	75	76	75	69
2	$\Delta, \%$	38	44	47	62	70	74	75	75	70

Из приведенных в таблице данных видно, что максимальная величина $\mathcal{E},\%$ достигается в растворах при концентрациях ПЭО $C_{ПЭО}$ равных $0,001-0,007 \text{ вес.}\%$.

Такая же величина эффекта была получена при использовании в качестве гидродинамически-активной добавки ПАА с молекулярной массой $4,2 \text{ млн.}$, который был синтезирован в опытном производстве НИФХИ им. Л. Я. Карпова (г. Москва).

Промышленные испытания гидродинамической эффективности ЖВПК, содержащей 5% вес. ПЭО и 95% вес. смеси глицерина и воды, с плотностью $1,23 \text{ г/см}^3$ проводили на участке трубопровода системы водоотведения шахты им. М.И. Калинина ГП «Донецкуголь» общей протяженностью 710 м. Выбранный участок состоял из труб диаметром 150 и 100 мм, длина которых соответственно была равна 230 и 480 метров. Для увеличения скорости растворения ПЭО полимерную суспензию нагревали до температуры $55\text{ }^\circ\text{C,}$ выдерживали при этой температуре в течении одного часа, а затем охлаждали до комнатной температуры.

Результаты испытаний показали (данные эксперимента приведены в табл. 8.6), что величина эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения ($\mathcal{E},\%$), на всем испытываемом участке, через 5 минут составила 12% , а через 15 мин. – 55% (при равных расходах воды и раствора полимерной композиции).

Таблица 8.6

Зависимость величины эффекта снижения ГСТТ, $\mathcal{E},\%$, от времени введения добавок ($\tau, \text{ мин.}$) в трубопровод. Данные получены на участке трубы диаметром $d=100 \text{ мм}$ и длиной $L=200 \text{ м.}$ Температура испытываемых жидкостей $t=28,5\text{ }^\circ\text{C}$

$\tau, \text{ мин.}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
$\mathcal{E}, \%$	12	37	55	57	60	59	58	60	59	60	60	60	60	60	59	60

Очевидно, что аналогичные результаты можно получить и при использовании ЖВПК в напорных трубопроводах канализационных систем, которые (по сравнению с системами водоотведения шахт) отличаются значительно большей длиной прямолинейных участков труб и меньшей минерализацией сточных вод. Следует ожидать, что эффективность применения ЖВПК в этих системах будет выше.

Таким образом, применение гидродинамически-активных полимерных композиций на основе ПЭО и ПАА открывает широкие перспективы повышения эффективности работы канализационных систем, сетей аварийного откачивания воды без привлечения дополнительных мощностей и существенного изменения их конструкции. При этом для каждого конкретного случая применения необходимо подобрать наиболее эффективную гидродинамически-активную полимерную композицию, которая обеспечит максимальное снижение гидравлических потерь в напорных трубопроводах.

Для предупреждения и ликвидации последствий затопления, кроме централизованных систем водоотведения, широко применяются мобильные установки аварийного откачивания воды и сточных вод. Обычно они представляют собой простейшие гидравлические системы, которые включают насос и трубопровод (или рукавную линию – пожарный рукав) для отвода воды. Лабораторные исследования и натурные испытания показали, что повысить эффективность использования таких установок можно за счет применения проточных генераторов (кассет) для ввода в перекачиваемую жидкость микродобавок ПЭО и ПАА путем размыва ультраслабых полимерных покрытий или водорастворимых полимерных наполнителей из флоковых покрытий. Такие покрытия наносятся на армирующие вставки, которые размещаются в корпусе проточной кассеты.

Следует отметить, что такое приготовление полимерных растворов может также эффективно использоваться в процессе приготовления модифицированных полимерными добавками рабочих жидкостей для гидроимпульсных машин (ГИМ) и гидроразрезного оборудования.

На рис. 8.2 представлена зависимость величины эффекта снижения ГСТТ $\Delta\lambda/\lambda$, % на контрольном участке трубопровода мобильной установки от времени активной работы генератора t , мин. с флоковым покрытием в качестве наполнителя которого использовалась тонкодисперсная суспензия ПЭО в дисперсионной среде – смеси глицерина с водой.

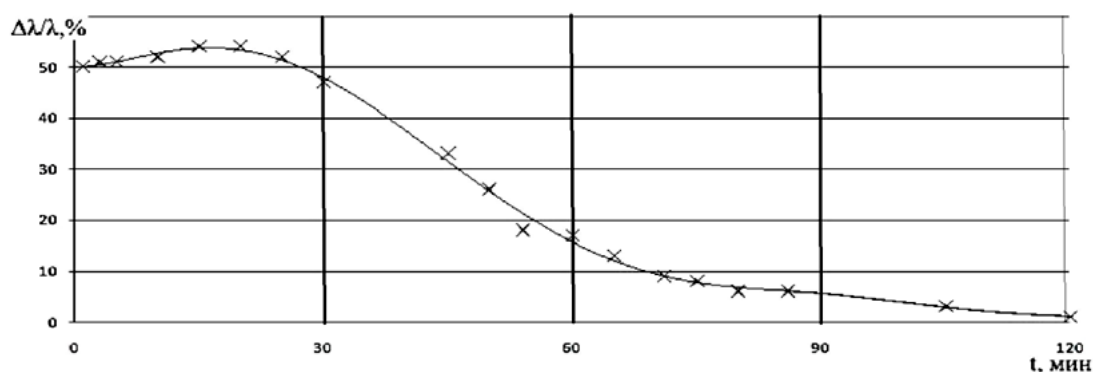


Рисунок 8.2 Зависимость величины относительного уменьшения турбулентного трения $\Delta\lambda/\lambda$, % от времени активной работы генератора с флоковым покрытием t , мин. (полимерный наполнитель флокового покрытия – тонкодисперсная суспензия порошка ПЭО с молекулярной массой 4,5 млн. в смеси глицерина с водой (плотность 1,22 г/см³), размер полимерных частиц ≤ 63 мкм).

Видно, что в течение первых 30 минут раствор ПЭО, который образуется за счет растворения наполнителя флокового покрытия, характеризуется существенным снижением гидродинамического сопротивления трения (величина $\Delta\lambda/\lambda$, %, в этом промежутке времени равна 46-55 %). Начиная с 30 минуты величина $\Delta\lambda/\lambda$, % в приготовленном растворе постепенно уменьшается. На 60 мин., с начала проведения эксперимента, она составляет 17,5 %, а на 120 мин. $\Delta\lambda/\lambda$, % = 0.

8.3.3. Совершенствование гидроструйных технологий [7,49-56]

Для повышения эффективности работы гидроимпульсной техники, предназначенной для разрушения твердых материалов, в т.ч. и при добычи каменного угля, были использованы ТВПК в виде УПП (НПС), которые наносились путем нагревания полимерной суспензии в литьевых формах на армирующие вставки проточного генератора приготовления полимерных растворов.

В ходе испытаний оценивалась эффективность использования струй (с полимерными добавками и без них) для разрушения блоков из гипса и углецементной смеси. Результаты этих исследований представлены на рис. 8.3 и рис. 8.4.

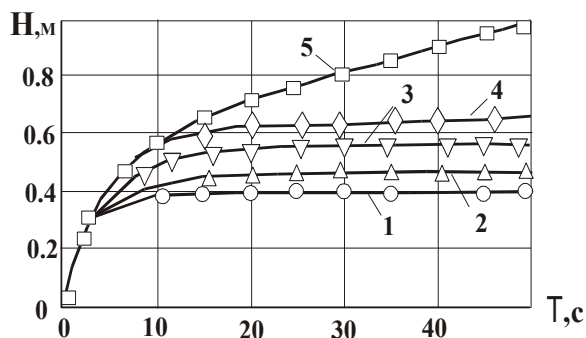


Рисунок 8.3 Зависимость глубины отверстия H , м, пробиваемого в гипсовом блоке, от времени действия гидроструи T , с.
1 – вода, 2, 3 – 0,002 и 0,004 % вес. водные растворы ПЭО, 4 и 5 – растворы, приготовленные из ТВПК в проточной кассете

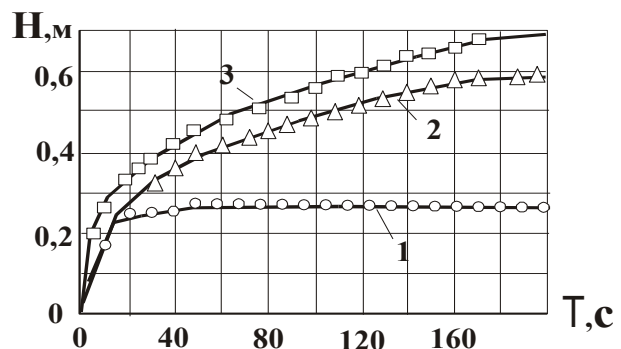


Рисунок 8.4 Зависимость глубины отверстия H , м, пробиваемого в углецементном блоке, от времени действия струи T , с.
1-вода, 2 и 3 растворы с ТВПК, которые были приготовлены в проточных кассетах

На рис. 8.3 приведены зависимости величины глубин отверстий H , м, которые пробивались в гипсовом блоке от времени действия струи T , с. Кривая 1 получена для водной струи; кривые 2 и 3 – при применении струй, сформированных из заранее приготовленных однородных растворов ТВПК с содержанием ПЭО, соответственно, 0,002% и 0,004% вес.. Кривые 4 и 5 соответствуют струям из растворов ТВПК, которые были приготовлены в проточных кассетах, когда с момента первого контакта материала ТВПК с водой составило 25 минут и 4 часа, соответственно. Начальное расстояние от среза сопла до поверхности гипсового блока в процессе испытаний было постоянным и равным 0,14 м. Из рис. 6.3 видно, что импульсные струи, которые были сформированы ГИМ из заранее приготовленных однородных растворов ТВПК, имеют более высокую разрушающую способность по сравнению с водной струей. Однако глубина отверстия H , которое пробивалось в гипсовом блоке, при этом увеличилась на незначительную величину.

Очевидно, что это связано с механической деструкцией макромолекул ПЭО в насосной установке высокого давления. Таким образом, использование заранее приготовленных растворов ПЭО считается нецелесообразным, а проточные кассеты с брикетами, с целью сохранения качества раствора, необходимо устанавливать после насоса высокого давления. Увеличение времени контакта материала ТВПК с водой повышает эффективность разрушения гипсового блока. Это связано с повышенной массоотдачей ПЭО из ТВПК, что приводит к увеличению содержания гидродинамически-активного полимера в растворе.

Дальнейшие исследования разрушающей способности водных струй и струй из растворов ТВПК проводились с использованием двух углицементных блоков, которые были изготовлены из смеси цемента (марка 400) и антрацита (размер частиц угля 6-10 мм) в различных соотношениях. Такие блоки моделируют угольные пласты с разной прочностью. Начальное расстояние от среза сопла до поверхности углицементного блока было равно 0,14 м.

На рис. 8.4 приведена зависимость величины глубин отверстий (H), которое пробивалось в углицементном блоке (с коэффициентом прочности по шкале М.Протодряконова равным 1,6) от времени действия струи (T , с.). Кривая 1 соответствует разрушению блока струей чистой воды; кривые 2 и 3 – струями из растворов ТВПК, которые были приготовлены в 2-х кассетах. При этом кривая 3 относится к случаю, когда центр отверстия, которое пробивалось в блоке, находился на расстоянии 0,35 м от бокового и верхнего ребер куба, а кривая 2 – на расстоянии 0,5 м.

Из приведенных на рисунке данных видно, что если в качестве рабочей жидкости использовать водные растворы ТВПК, то глубина отверстия, которое пробивается в блоке, в 1,5-3,5 раза (в зависимости от продолжительности работы ГИМ) больше глубины отверстия, которое пробивается струей чистой воды.

Особый интерес представляют результаты эксперимента по разрушению углицементного блока, у которого коэффициент прочности равен 2,5, при увеличении до 0,22 м начального расстояния от среза сопла до поверхности блока. Этот блок моделирует угольный пласт повышенной прочности. Разрушение блока проводили до момента прекращения роста глубины отверстия. Наибольшая глубина отверстия, которое было пробито импульсной струей воды, равна 0,22 м, а струей водного раствора ТВПК – 0,71 м.

Таким образом, использование в качестве рабочей жидкости водных растворов гидродинамически-активного ПЭО, позволяет существенно повысить эффективность работы ГИМ путем увеличения глубины отверстия, которое пробивается в твердом материале (за счет значительного снижения ГСТТ в проточных частях основных узлов ГИМ и в трубопроводах), а также в результате улучшения геометрических и динамических параметров струи.

8.4. Практическое применение композиций на основе МПАВ [7]
 8.4.1. Повышение эффективности работы систем централизованного
 холодоснабжения [65-68,264]

С целью повышения эффективности работы шахтных установок кондиционирования воздуха (ШУКВ) были разработаны составы холодоносителей на основе промышленных паст диталан OTS и метаупон (табл. 8.7).

Таблица 8.7

Составы промышленных паст

Диталан OTS	%	Метаупон	%
Аммонийные соли, соли сульфозиров	40	β -[N-метил-N-оленоил] этилсульфокислоты натриевая соль	32
Полиэтиленгликоль	2		
Мочевина	5	Хлористый натрий	10
Полифосфат натрия	2	Едкий натр	0.5
Вода	51	Вода	57.5

Метаупон и диталан OTS эффективно снижают гидродинамическое сопротивление только в присутствии электролитов, оптимальные концентрации которых, например, по хлористому натрию, равны 3 и 8 % соответственно. Указанные ПАВ являются анионактивными, поэтому с целью устранения гидролиза водородный показатель среды их растворов необходимо поддерживать в диапазоне $pH=9-11$ (например, за счет введения в раствор небольшого количества едкого натра). Диталан OTS мало эффективен при температурах больше $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако в области низких температур сохраняет высокую гидродинамическую эффективность. Это открывает широкие перспективы его применения в составе хладоносителей систем умеренного холода.

Испытания хладоносителей с добавками диталана OTS и метаупона проводились в установке кондиционирования воздуха шахты «Социалистический Донбасс» производственного объединения «Донецкуголь».

На первом этапе в системе трубопроводов основного хладоносителя был испытан хладоноситель на основе диталана OTS. Подобренный состав хладоносителя (диталан OTS, хлористый натрий, карбонат натрия, шахтная вода) был испытан в гидравлическом контуре (части системы трубопроводов основного хладоносителя шахтной установки кондиционирования воздуха общей длиной 6,5 км), который расположен в коренном откаточном штреке (горизонт 814 м), бортовой лаве (подъем с горизонта 814 м на горизонт 705 м) и на горизонте 705 м. Выбор данного контура был сделан с целью проверки гидродинамической эффективности хладоносителя в условиях повышенного давления, определяемого

разностью высот гор. 705 и 814 м. Для растворения и введения добавок ПАВ в систему трубопровода было изготовлено специальное оборудование.

В процессе испытания были измерены потери давления на прямых участках трубопровода и во всем контуре в целом при различных значениях расхода хладоносителя. Расход изменяли с помощью вентиля, установленного на выходе из насоса. При этом потери давления измеряли манометром, а расход хладоносителя водомером. На рис. 8.5 приведена зависимость потерь давления ΔP от расхода хладоносителя q на прямолинейном участке трубопровода диаметром 100 мм и длиной 443 м для воды (кривая 1) и водного 1,98 % раствора диталана OTS в присутствии 3 % хлористого натрия и 0,15 % карбоната натрия (кривая 2). На рис. 8.6 показана аналогичная зависимость для всей испытываемой системы трубопроводов.

Видно, что при расходе $q=9$ л/с (оптимальный режим работы шахтной холодильной установки) потери давления для хладоносителя с добавкой диталана OTS, на участке длиной 443 м, уменьшаются, по сравнению с используемым, с 1,1 до 0,5 кг/см². При этом величина эффекта снижения гидродинамического сопротивления равна 53,5 %.

При таком же расходе для системы в целом (см. рис. 8.6) снижение сопротивления (с учетом разности высот горизонтов) составляет 47 %. Несколько меньшее значение суммарного эффекта, по сравнению с его величиной на прямом участке, можно объяснить наличием большого количества местных сопротивлений в системе (поворотные колена, задвижки, воздухоохладители), на которых добавки ПАВ временно теряют свою гидродинамическую эффективность.

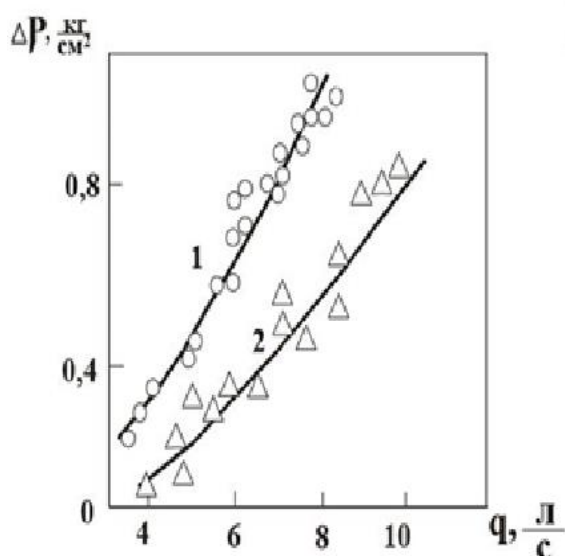


Рисунок 8.5 Зависимость потерь давления ΔP от расхода хладоносителя q на прямолинейном участке трубы длиной 443 м

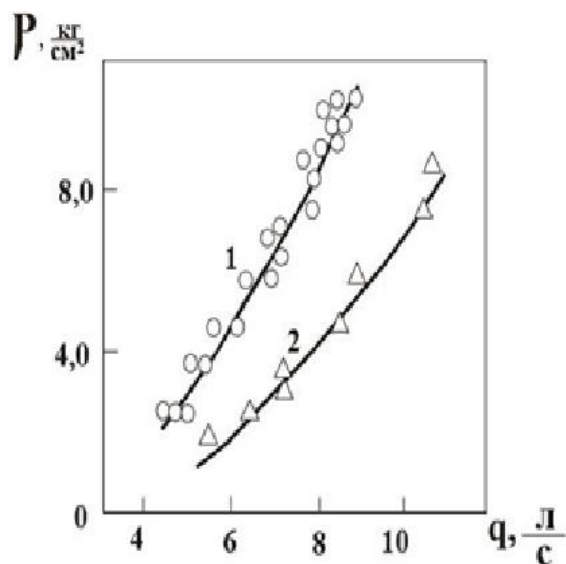


Рисунок 8.6 Зависимость потерь давления в системе трубопроводов основного хладоносителя длиной 6,5 км

На втором этапе, с использованием промышленной пасты метаупон, проводились испытания хладоносителя во всей системе трубопроводов подземной части холодильной установки с общей длиной трубопроводов 14,5 км. В течении двух лет эксплуатации этого хладоносителя наблюдалось стабильное снижение гидродинамического сопротивления на 50 %.

8.4.2. Улучшение виброакустических характеристик гидравлических систем [7,77,78]

В последние годы проблеме изучения шума и вибрации, разработке технологий уменьшения их уровня уделяется большое внимание. Интерес исследователей связан не только со снижением воздействия шума и вибрации на организм человека, с целью разработки и внедрения современных технологий и технических средств по безопасным условиям труда, но и с разработкой научных основ создания совершенных конструкторских решений для выпуска различных машин и оборудования с улучшенными виброакустическими характеристиками (ВАХ).

Одними из основных источников шума и вибрации являются гидравлические системы. Шумы гидродинамического происхождения по природе образования принято делить на вихревые шумы, шумы от неоднородностей потока и звук вращения [268].

По мнению специалистов, занимающихся проблемами виброакустики, самым эффективным способом улучшения ВАХ гидравлических систем является способ уменьшения шума и вибрации в источнике их возникновения. Реализацию этого метода можно осуществить посредством воздействия на процессы, протекающие в проточных частях машин и в магистральных трубопроводах, изменением их конструктивных параметров, а также применением чисто акустических способов вибро- и шумозащиты.

Анализ работ, посвященных исследованиям источников шума и вибрации гидродинамического происхождения, показал, что к основным аэрогидродинамическим источникам, ухудшающим ВАХ гидравлических систем, следует отнести: пульсации турбулентного потока; пульсации давления пограничного слоя на обтекаемых поверхностях; пульсации давления на лопатках рабочих колес и спрямляющих элементах вследствие срыва или схода вихрей пограничного слоя; пульсации давления, вызываемые взаимодействием неоднородного потока с обтекаемыми телами; вращение твердых тел в жидкой среде; кавитационные процессы в проточных частях машин и систем; термические процессы; процессы выпуска воздуха (газа) или жидкости через клапаны и т.д.

Многочисленными исследованиями, выполненными у нас в стране и за рубежом, установлено, что одним из наиболее эффективных и сравнительно легко реализуемых способов улучшения ВАХ, за счет

уменьшения шума и вибрации в источнике, может быть использование в качестве рабочих жидкостей гидравлических систем растворов высокомолекулярных гидродинамически-активных полимеров (полиэтиленоксида – ПЭО, полиакриламида – ПАА и т.д.). Так, например, в водных растворах высокомолекулярного ПЭО при его концентрации $C=5 \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3$ и среднерасходной скорости течения $U_{cp}=3-10 \text{ м/с}$ спектральные уровни мощности пульсаций давления на низких и средних частотах снижаются в 5-8 раз, на высоких (при $f=10^4 \text{ Гц}$) в 100 раз.

Однако, указанный выше способ не может быть использован для замкнутых гидравлических систем, включающих насосы для перекачки рабочих жидкостей. Это обусловлено деструкцией (разрывом) полимерных молекул при их прохождении через насосы, приводящей, в конечном итоге, к полной потере добавками способности снижать как гидродинамическое сопротивление трения, так и уровни пульсаций давления в потоке.

Установлено, что устранить указанные выше недостатки можно путем использования в качестве рабочих жидкостей водных растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ, которые обладают свойством восстанавливать свою гидродинамическую эффективность после прохождения через насосы.

Так, например, в качестве рабочей жидкости предлагается использовать водные растворы МПАВ - натриевой соли β -[N-метил-N-оленоил] этилсульфоокислоты, которые дополнительно содержат хлористый натрий и едкий натр при следующем соотношении компонентов (в *вес. %*):

– натриевая соль β -[N-метил-N-оленоил] этилсульфоокислоты	0.1-2.0
– хлористый натрий (NaCl)	4.0-16.0
– едкий натр (NaOH)	0.005-0.15
– вода	остальное.

Результаты экспериментов показали, что при использовании в качестве рабочей жидкости раствора ПАВ указанного выше состава наблюдается значительное улучшение (по сравнению с водой) виброакустических характеристик:

– при скорости течения 5-7 м/с уровень вибраций трубопровода снизился на 6-8 дБ в диапазоне частот 60-200 Гц, на 15-18 дБ в диапазоне частот 200-1500 Гц и на 6-12 дБ в диапазоне частот 1500-20000 Гц;

– при скорости потока 3-4 м/с уровни вибраций трубопровода практически легли на уровень помех;

– уровни вибраций центробежного насоса уменьшились на 4-6 дБ в диапазоне частот 40-1000 Гц и на 8-10 дБ в диапазоне частот 1000-20000 Гц;

– уровень пульсаций давления в потоке снизился на 28 дБ в диапазоне частот 500-20000 гЦ; на частотах до 500 Гц сигнал лег на уровень помех;

– энергия, затрачиваемая на циркуляцию рабочей жидкости с добавкой ПАВ, снизилась в 2,6 раза вследствие уменьшения гидравлического сопротивления трубопровода на 75-78 %.

Рабочая жидкость (раствор смеси МПАВ с хлористым натрием и едким натром указанного выше состава) непрерывно циркулировала по замкнутому контуру гидроакустического стенда в течение 310 часов. При этом наблюдалось стабильное снижение гидродинамического сопротивления, уровней вибраций и пульсаций давления в течение всего указанного временного цикла испытаний.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что добавки МПАВ могут найти широкое практическое применение в замкнутых гидравлических системах для улучшения их виброакустических и гидродинамических характеристики.

8.5. Снижение ГСТТ при гидротранспорте сыпучих материалов [265]

Значительное снижение турбулентного трения, получаемого при введении в поток жидкости добавок полимеров, стимулировало работы по изучению возможности использования этого явления в канализационных системах и системах водоотведения, а также при гидротранспорте сыпучих материалов. Из известных публикаций первой в этом направлении является работа М. Poreh, в которой сообщается о 30%-ном уменьшении с помощью полимерных добавок потерь напора при транспортировке суспензии частиц шлака с объемным содержанием 7 % *вес.* по магистрали диаметром 15,2 см и длиной 805 м. Вид полимера, концентрация которого в эксперименте составила $C=3,6 \cdot 10^{-4}$ г/см³, авторами работы не приводится. А.Н. Шабрин показал возможность использования ПАА для снижения гидравлических потерь при движении водной суспензии кварцевого песка, объемная концентрация которого составляла 12 % *вес.*

В дальнейшем поставленные вопросы получили свое развитие в работах по влиянию добавок ПАА на гидродинамическое сопротивление взвесенесущих потоков. В опытах в качестве твердой фазы использовали кварцевый песок, золу, глину, бурый и каменный угли. Эксперимент проводился на трубке диаметром 0,7 см при числе Рейнольдса для воды $Re=1,23 \cdot 10^4$. Концентрация ПАА менялась в пределах $C_{II}=0-10^{-3}$ г/см³, весовая концентрация песка варьировалась в интервале $C_T=0-37,5\%$.

Получено, что при течении раствора ПАА без твердой компоненты ($C_T=0$) в области малых концентраций полимера имеет место увеличение эффекта, который достигает максимального значения $\Delta\lambda/\lambda=58\%$ при некоторой оптимальной концентрации ПАА ($C_{II}=2,4 \cdot 10^{-4}$ г/см³). При дальнейшем увеличении концентрации полимера величина эффекта уменьшается. Добавление твердой компоненты (песка) в раствор ПАА приводит к уменьшению величины эффекта во всей области изменения концентраций полимера. При этом максимальное снижение сопротивления (для всех исследуемых концентраций твердой фазы) достигается при одной

и той же концентрации полиакриламида ($C_{II}=2,4 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$). С увеличением концентрации песка величина эффекта уменьшается.

На рис. 8.7 приведены данные опытов, где в качестве твердой компоненты использовались золы, отработанные на ГРЭС. Крупность частиц золы 0-2,5 мм, удельный вес $1,3 \text{ г/см}^3$. Из рис. 8.7 видно, что с увеличением концентрации ПАА величина снижения ГСТТ возрастает и достигает максимального значения при $C_{II}=5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ (для всех концентраций твердой фазы). При этом максимальная величина эффекта больше, чем для соответствующих концентраций песка. Это связано с различием удельных весов золы и песка, вследствие чего на работу взвешивания частиц золы в турбулентном потоке затрачивается меньшая энергия.

На рис. 8.8 приведены опытные данные для водного взвесенесущего потока, содержащего кварцевый песок весовой концентрации $C_T = 10\%$ (крупность 0,1-0,3 мм) и полиакриламид концентрации $C_{II}=2,2 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$. По оси абсцисс отложено число Рейнольдса Re , а по оси ординат - коэффициент гидродинамического сопротивления λ . Вязкость водопесчаной смеси, по которой определялось число Re , рассчитывалась по формуле (8.6).

$$\mu_c = \mu_0 \left[1 + \frac{2C_v}{(1 - 1,2C_v^{2/3})^2} \right], \quad (8.6)$$

где μ_0 – вязкость воды; C_v – объемная концентрация твердой фазы.

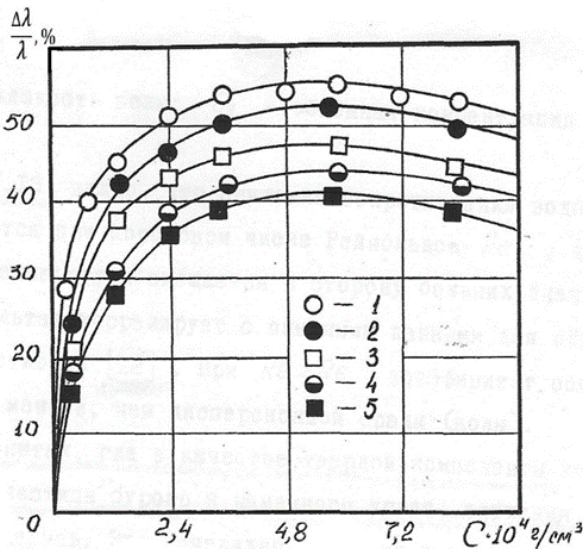


Рисунок 8.7 Зависимость величины $\Delta\lambda/\lambda, \%$ от концентрации ПАА для взвесенесущего потока с концентрацией золы:
 1 - $C_T=0\%$ вес.; 2 - $C_T=7,5\%$ вес.;
 3 - $C_T=15\%$ вес.;
 4 - $C_T=22,5\%$ вес.; 5 - $C_T=30\%$ вес.

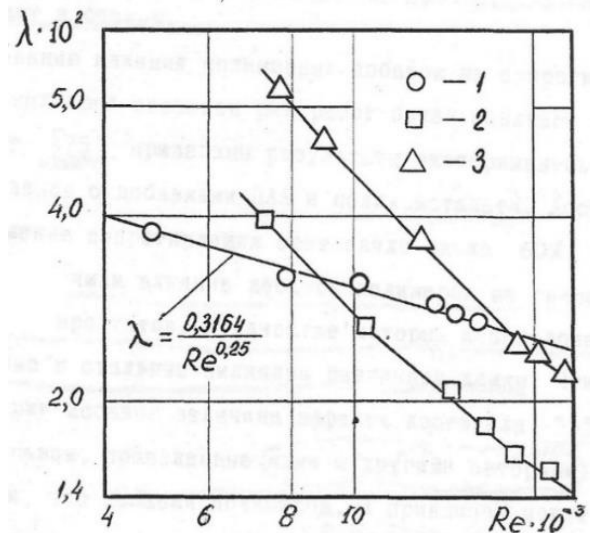


Рисунок 8.8 Зависимость величины λ от Re при течении чистой воды (1) и раствора ПАА ($C_{II}=2,2 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$) с песком ($C_T=10\%$ вес.) при температурах $T=20^\circ\text{C}$ (2) и $T=31^\circ\text{C}$ (3).

Из рис. 8.8 видно, что снижение сопротивления водопесчаной смеси начинается при пороговом числе Рейнольдса Re_{np} , которое с увеличением температуры смещается в сторону больших значений. Полученный результат коррелирует с опытными данными для однородных полимерных растворов. При $Re > Re_{np}$ коэффициент сопротивления λ водопесчаной суспензии меньше, чем у дисперсионной среды (воды).

В опытах, где в качестве твердой компоненты суспензии использовались мелкие частицы бурого и каменного углей, снижения сопротивления не наблюдалось. Это, очевидно, связано с тем, что молекулы ПАА адсорбируются на частицах угля и вследствие этого теряют способность воздействовать на турбулентность. Отрицательные результаты получены и в опытах с растворами буровой глины. При введении добавок ПАА в раствор глины образуются хлопья, которые выпадают в осадок.

Исследованию влияния полимерных добавок на сопротивление трения многофазных сред посвящен ряд работ более позднего периода. J. Polert, B. Latto и S.W. Lee приводят результаты экспериментов по гидротранспорту шламов с добавками ПАА и поликристаллата. Достигнутое в опытах снижение сопротивления составляло около 60%. B. Latto и S.W. Lee изучили влияние добавок полимеров на гидротранспорт капсулированных продуктов, в качестве которых использовались сплошные алюминиевые и стальные цилиндры различной длины. При оптимальной концентрации добавок величина эффекта достигала 35%.

Таким образом, проведенные исследования показали, что добавки полимеров могут быть использованы для повышения эффективности работы гидротранспорта взвесенесущих сред, а также для снижения гидравлических потерь в трубопроводах канализационных систем и систем водоотведения сточных вод, которые загрязнены механическими примесями. Однако при практической реализации этого метода снижения турбулентного трения необходимо свести к минимуму или вообще исключить воздействия насосов на полимерные молекулы, а главное – флокулирующее воздействие полимеров на тонкодисперсную часть транспортируемых веществ. Частично эти проблемы были решены авторами работ, которые применяли для снижения ГСТТ мицеллообразующие поверхностно-активные вещества и различные полимерные композиции.

На рис. 8.9 представлены результаты опытов с однородными и взвесенесущими потоками, в которых использовалась смесь двух ПАВ - пальмитата натрия и стеарата калия, взятых в количественном соотношении 9:1. Предварительно выполненные эксперименты показали, что в водном растворе такой смеси наблюдается значительное снижение гидродинамического сопротивления - до 72% при концентрации добавки $C=0,11\%$. Для улучшения растворимости указанных ПАВ раствор подогревался до 31°C . В опытах использовался кварцевый песок

крупностью 0,1-0,3 мм. Вязкость суспензии, по которой определялось число Рейнольдса, рассчитывалась по формуле (8.6).

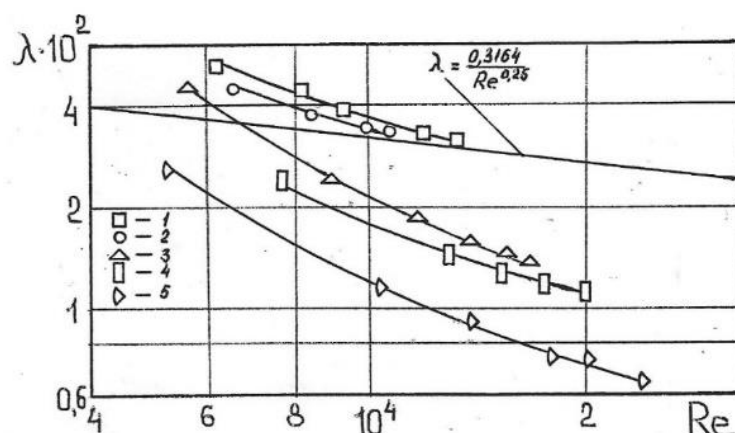


Рисунок 8.9 Зависимость величины λ от Re для взвесенесущего потока:
 1 - $C_T=20\%$ вес.; 2 - $C_T=10\%$ вес.; 3 - $C_T=20\%$ вес., $C_{П}=0,12\%$ вес.;
 4 - $C_T=10\%$ вес., $C_{П}=0,12\%$ вес.; 5 - $C_T=0\%$ вес., $C_{П}=0,12\%$ вес.

Из рис. 8.9 видно, что добавки ПАВ приводят к существенному снижению сопротивления воды и суспензии. С увеличением концентрации твердой фазы величина эффекта несколько уменьшается, но остается довольно значительной. При $Re = 2 \cdot 10^4$ и концентрации твердой фазы (кварцевого песка) $C_m=10$ и 20% величина эффекта составляет 60 и 50% соответственно.

Сопоставление полученных результатов с опытными данными для взвесенесущих, потоков с добавками полимера показывает, что для получения одинаковых по величине эффектов снижения сопротивления необходима большая концентрация ПАВ. Однако в отличие от полимеров добавки ПАВ после прохождения через насосы способны восстанавливать свою гидродинамическую эффективность. Следовательно, ПАВ могут быть успешно использованы для повышения эффективности гидротранспорта взвесенесущих сред [265].

8.6. Снижение гидравлических потерь в глинистых и гипсовых растворах [269]

В процессе проведения строительных работ (при бурении скважин) возникает необходимость повышать скорость течения подаваемых в скважину (забой) промывочных жидкостей. При этом в результате роста гидравлических потерь в напорных трубопроводах, существенно увеличиваются затраты электроэнергии, а также резко возрастает давление в забое, что затрудняет работу бурового инструмента.

Многочисленные попытки снизить ГСТТ путем введения в глинистый раствор добавок высокомолекулярных полимеров (полиэтиленоксида – ПЭО, полиакриламида – ПАА) желаемого результата не дали. Это связано с интенсивной механической деструкцией этих добавок и нежелательными физико-химическими явлениями, такими как, коагуляция и флокуляция дисперсной фазы. Так, например, в процессе проведенных исследований было установлено, что ПАА вызывает интенсивную флокуляцию твердой фазы в глинистом растворе, которая препятствует проявлению эффекта снижения гидродинамического сопротивления.

В ходе ликвидации подземных пожаров в угольных шахтах, широкое применение получили комплексы оборудования СНУ Темп-200, Темп-500, которые предназначены для дистанционного возведения безврубных, взрывоустойчивых и изолирующих перемычек из гипсовых вяжущих, которые применяются для изоляции пожаров в шахтах [270].

При эксплуатации комплексов типа «Темп» очень часто возникают технические трудности, которые, в первую очередь, связаны с транспортировкой гипсовых растворов по трубопроводам. Установлено, что за счет быстрого схватывания водогипсовой смеси её укладка в опалубку идет с низкой скоростью, оборудование работает со значительными перегрузками, а в ряде случаев схватывание гипсового теста происходит непосредственно в подающем водно-гипсовую смесь трубопроводе или в рукавной линии. Кроме этого, возводимые перегородки обладают низкой водостойкостью, высокой ползучестью под нагрузкой, хрупкостью при использовании в тонкостенных элементах, что значительно ухудшает их эксплуатационные качества.

Для замедления схватывания гипсовой смеси в нее рекомендуют добавлять животный клей или сульфатно-спиртовую барду (ССБ) в количестве $0,1 \div 3,0$ вес. % от массы гипса. Эти вещества, адсорбируясь на зернах полуводного гипса, уменьшают его растворимость и тем самым замедляют процесс схватывания гипсового теста. Однако широкого применения вышеуказанные добавки не получили, т.к. увеличение промежутка времени с момента затворения гипса до начала схватывания было незначительным. При этом происходит также ухудшение физико-механических и эксплуатационных свойств получаемого гипсового камня.

Существенно увеличить промежуток времени с момента затворения до начала схватывания водногипсовой смеси можно за счет ввода в затворяющую гипс воду микродобавок высокомолекулярных полимеров. При этом, за счет снижения добавками полимеров гидравлических потерь в подающих водно-гипсовую смесь трубопроводах, увеличивается ее расход, что может значительно сократить время, необходимое на возведение гипсовых перегородок.

Лабораторные исследования [7]. В качестве добавок к затворяющей гипс воде были выбраны: сульфатно-спиртовая барда (ССБ), как прототип,

и водорастворимый высокомолекулярный полимер (ПЭО) с молекулярной массой $(2,5 \dots 4,2) \cdot 10^6$.

Как показали результаты исследований, использование ССБ увеличивает промежуток времени с момента затворения до начала затвердевания гипсового теста в $1,1 \dots 1,2$ раза. При этом промежуток времени, с момента затворения до окончания схватывания гипса, возрастает в $4 \dots 5$ раз, а прочностные характеристики гипсового камня ухудшаются.

С целью разработки практических рекомендаций были проведены исследования по влиянию добавок ПЭО и ПАА на следующие характеристики гипсовых растворов и образующегося из них гипсового камня: нормальную густоту, оптимальное соотношение гипс – затворяющая жидкость, которые определяют транспортировку смеси по трубопроводу и обеспечивают формирование гипсового камня требуемой прочности; промежутки времени с момента затворения гипса до времени начала и окончания схватывания гипсового теста; предел прочности при сжатии образовавшегося гипсового камня.

Проведенные на вискозиметре Суттарда испытания для трех разновидностей гипса – фосфогипса, шлакогипса и гипса А – показали, что нормальная густота теста достигается при соотношении гипс – вода 7:3.

Определение предела прочности образующегося гипсового камня проводили по следующей схеме. Первоначально из исследуемого гипса с различными затворяющими жидкостями, изготавливали по три образца в виде кубиков с размерами $7,07 \times 7,07 \times 7,07$ см. Для изготовления образцов брали навеску гипса, равную примерно $1,2$ кг. Гипс в течение 30 сек засыпали в чашку с водой или полимерным раствором, взятыми в количестве, соответствующем нормальной густоте теста, и перемешивали в течение 1 мин до получения однородной массы, которую затем заливали в металлические формы, слегка смазанные машинным маслом. Все формы заполняли одновременно. Образцы вынимают из форм через 1 час и испытывали через $1,5$ часа от начала затворения. Грани образца, прилегающие к плитам пресса, должны быть параллельны и не иметь отклонений от плоскости больше, чем на $0,5$ мм. Образцы с дефектами не испытывали.

Нагрузка при испытании на прессе должна возрастать равномерно со скоростью $2-3$ кг/см² в секунду до разрушения образца. Предел прочности при сжатии отдельного образца вычисляли в кг/см², как частное от деления величины разрушающей нагрузки в кг на величину площади рабочей грани образца в см². Предел прочности гипса при сжатии вычисляли как среднее арифметическое значение результатов испытаний трех образцов.

Результаты эксперимента для всех трех исследованных разновидностей гипса показали, что введение в затворяющую жидкость $(0,00075 \div 0,01)$ вес. % высокомолекулярного ПЭО позволяет на $(10-25)$ % увеличить прочность гипсового камня при сжатии.

Гидравлические потери при подаче водно-гипсовой смеси и этой же смеси с добавками определяли на гидродинамической установке с постоянным перепадом давления. (длина трубы – 3 м, диаметр – 20 мм). Такая установка позволяет определить время истечения определенного объема гипсового раствора от его выдержки во времени. При этом с достаточной точностью определяются времена истечения гипсовых растворов самых различных концентраций, несмотря на то что в них происходит достаточно быстрое изменение физико-химических свойств.

Экспериментальные исследования проводили с использованием образцов фосфогипса и гипса А. Анализ полученных результатов показал, что при концентрациях ПЭО в затворяющей гипс жидкости, меньших 0,0005 вес. % наряду с уменьшением скорости схватывания гипса происходит уменьшение гидравлических потерь. Так, при концентрации фосфогипса равной 55 вес. % в затворяющей жидкости, которая, в свою очередь, содержит 0,0005 вес. % ПЭО, величина промежутка времени с момента затворения до начала схватывания увеличивается в среднем на 20 %, а время истечения уменьшается на 3-ей и 5-ой минутах, с момента начала приготовления смеси, в 1,7 и 2,1 раза соответственно.

Полигонные испытания [7,271,272]. Полигонные испытания по определению влияния полимерных добавок на транспортировку гипсовых растворов по трубопроводам были проведены на полигоне 3-го взвода ГВГСС Минутлепрома Украины (г. Макеевка, Донецкая обл.) с использованием комплекса СНУ Темп-500 и вспомогательного оборудования для растворения и дозированного ввода микродобавок полимерных композиций в рукавную линию.

В ходе полигонных испытаний, которые проводились в два этапа, контролировались следующие параметры: время выхода установки на оптимальный режим, сек; давление гипсовой смеси на выходе из СНУ, кг/см²; расход воды через гипсосмеситель, л/с; ток, потребляемый электродвигателем гипсосмесителя, А; давление воды, создаваемое подпиточным насосом, кг/см²; концентрация полимера в затворяющей гипс жидкости, вес.%; время схватывания гипсового блока, сек.

Для подачи гипсового раствора использовали пожарные рукава с внутренним диаметром 51 мм и длиной 140 метров. На конце рукавной линии устанавливали ручной пожарный ствол с внутренним диаметром насадка 18 мм.

На первом этапе испытаний использовались в качестве затворяющей гипс жидкости использовали растворы ЖВПК, ввод и дозирование которых в рукавную линию осуществляли с помощью модифицированного пеносмесителя ПС-1, на всасывающем патрубке которого были установлены калиброванные шайбы диаметром 1,8; 2,04 и 2,2 мм. Концентрированные растворы полимеров приготавливали непосредственно перед испытаниями.

Контроль расхода концентрированного раствора ЖВПК производился с помощью мерной емкости и секундомера. Например, при использовании шайбы диаметром живого сечения равном 1,8 мм, расход концентрированного раствора, содержащего 0,05 вес. % ПЭО, при расходе воды по рукавной линии равном 1,45 л/с, составил 2,8 мл/с.

На втором этапе затворяющую гипс жидкость с полимерными добавками приготавливали путем размыва твердых водорастворимых полимерных композиций (ТВПК) в проточной кассете, установленной в рукавную линию. Результаты испытаний приведены в табл. 8.8. Из приведенных данных видно, что приготовление раствора полимерной композиции на основе ПЭО (эксперимент № 2) приводит к снижению гидравлических потерь в рукавной линии, при подаче гипсового раствора, с 0,5 кг/см² до 0,25 кг/см², и уменьшению потребляемого тока с 17 А до 14 А.

Следует ожидать, что увеличение длины рукавной линии, по которой подается водно-гипсовая смесь, приведет к еще большему снижению гидравлических потерь и уменьшению потребляемого СНУ тока за счет увеличения вклада потерь на трение (по сравнению с потерями на местных сопротивлениях).

Результаты опытов № 3 и № 4 показывают, что использование в качестве затворяющей гипс А жидкости водного раствора полимерной композиции с содержанием ПЭО $2,3 \cdot 10^{-4}$ вес.% уменьшает давление в рукавной линии с 2,5 до 1,2 кг/см², а потребляемый СНУ ток с 19,5А до 16,5А.

Аналогичные данные получены для фосфогипса (опыты № 5 и № 6).

Таблица 8.8

Результаты полигонных испытаний

№п/п	Испытываемая жидкость	Давление в рукавной линии, кг/см ²	Расход воды, л/с	Давление воды создаваемое подпиточным насосом, кг/см ²	Потребляемый ток, А	Содержание ПЭО в затворяющей жидкости, вес. % $\cdot 10^{-4}$	Примечание
I-й Этап							
1.	Вода	0,5	1,48	3,0	17	0	Затворяющую гипс жидкость приготавливали путем предварительного растворения полимерной композиции и подачи полученного раствора в рукавную линию ПС-1
2.	Раствор полимерной композиции	0,25	1,45	3,0	14	3,5	
3.	Гипс А + вода	2,5	1,45	3,0	19,5	0	
4.	Гипс А + водный раствор полимерной композиции	1,2	1,45	3,0	16,5	2,3	
II-й Этап							
5.	Фосфогипс + вода	2,6	1,45	3,0	20	0	Затворяющую гипс жидкость приготавливали размывом ТВПК в кассете
6.	Фосфогипс + водный раствор ТВПК	1,0	1,45	3,0	17	2,0	

Для приготовления модифицированной микродобавками полимеров затворяющей гипс жидкости использовали проточную кассету с брикетом из ТВПК. Видно, что введение в затворяющую фосфогипс воду $2,0 \cdot 10^{-4}$ вес. % высокомолекулярного ПЭО уменьшает давление в рукавной линии с 2,6 до $1,0 \text{ кг/см}^2$, а потребляемый СЧУ ток с 20 А до 17 А.

Таким образом, если в качестве затворяющих гипс жидкостей использовать слабоконцентрированные ($0,0002 \div 0,00075$ вес. %) растворы высокомолекулярного ПЭО, то можно в 1,2-1,5 раза увеличить величину промежутка времени с момента затворения до начала схватывания гипса. Кроме этого, в процессе транспортировки гипсового раствора по рукавной линии гидравлические потери уменьшаются на 45-60 %. Введение микродобавок приводит также к повышению на (10-25) % прочность на сжатие образующегося гипсового камня. При этом время с момента затворения до окончания схватывания гипса практически не изменяется [265,269].

8.7. Применение гидродинамически-активных композиций для полимерной локализации токсикантов в литосфере [273]

Существующие на сегодняшний день способы локализации сильно загрязненных участков грунтов, в основном, связаны с созданием непроницаемых подземных экранов путём укладки изолирующих материалов, нагнетания цементирующих растворов и жидкого азота. Эффективным также является способ, в основу которого положено разрезание грунта с последующим заполнением образовавшейся щели глиняными, гипсовыми растворами или асфальтобитумной эмульсией.

В монографии [274] приведены результаты исследований физико-химической природы проявления эффектов упругих деформаций при течении заранее приготовленных растворов полимеров в пористых средах и на этой основе разработаны эколого-технологические критерии применения способа полимерной локализации токсикантов в литосфере.

В работах сотрудников Донецкого национального университета, выполненных в течении последних двадцати лет, систематизированы, уточнены известные и разработаны новые ВПК на основе гидродинамически-активных высокомолекулярных полимеров – ПЭО и ПАА, которые обеспечивают экспресс приготовление однородных растворов с максимальным сохранением молекулярной массы полимеров. В отличие от классического способа растворения ПЭО и ПАА, который занимает во времени около суток, применение водорастворимых полимерных композиций (в составе генераторов) обеспечивает приготовление однородных растворов в течение 10-20 секунд.

Использование таких ВПК и генераторов значительно упрощает реализацию технологии полимерной локализации токсикантов в литосфере.

При этом применение в качестве рабочих жидкостей растворов ВПК существенно повышает эффективность работы ГРМ и ГИМ за счет снижения ГСТТ в проточных частях основных узлов машин и в трубопроводах подачи рабочих жидкостей, а также в результате улучшения геометрических и динамических параметров разрушающих грунт струй.

Полученные в рамках работы результаты показывают возможность применения гидроструйных технологий для создания в грунте щели с последующим ее заполнением изолирующими материалами или однородными полимерными растворами из ВПК [273].

Раздел 9. Применение ВПК для улучшения экологической обстановки на животноводческих комплексах [7,275-278]

9.1. Общие сведения [7]

В связи с концентрацией и переводом животноводства на промышленную основу наиболее мощными источниками загрязнения окружающей среды в сельской местности стали крупные животноводческие комплексы.

Так, например, количество жидкого навоза на одном свиноводческом комплексе по откорму 108 тыс. свиней в год достигает 300 тонн в сутки, на комплексе по откорму 10 тыс. голов молодняка КРС – 250 тонн в сутки.

Количество и мощности таких животноводческих комплексов в последние годы увеличиваются во всех странах мира. При этом объем отходов животноводства уже значительно превышает количество коммунальных стоков, например, в Германии – в 5 раз, в США – в 10 раз. Подсчитано, что стадо в 100 тыс. голов КРС или 500 тыс. свиней загрязняют окружающую среду (по некоторым экологическим показателям), как промышленный город с миллионным населением.

Эти данные свидетельствуют о возросшей серьезности проблемы защиты окружающей среды от загрязнения отходами животноводства. Без преувеличения можно сделать вывод, что животноводческие и птицеводческие комплексы являются самыми крупными источниками загрязнения атмосферного воздуха, почвы, водоемов в сельской местности, а по мощности и масштабам загрязнения вполне сопоставимы с крупнейшими промышленными объектами – заводами, комбинатами и т.п.

В связи с вышеизложенным, возникла необходимость организации в каждом хозяйстве сложной системы переработки больших масс отходов – продуктов жизнедеятельности животных, к которым следует отнести навозные стоки, остатки корма и подстилочный материал. В условиях концентрации значительного поголовья животных на ограниченной территории отходы животноводства представляют собой потенциальный и особо опасный источник загрязнения окружающей среды.

На животноводческих предприятиях технология содержания крупного рогатого скота и свиней исключает возможность герметизации основных производственных процессов. Поэтому в окружающую среду неизбежно попадают газовые примеси, обусловленные жизнедеятельностью животных.

В первую очередь к таким загрязняющим воздух примесям следует отнести выдыхаемые и клоачные газы, а также процессы эволюции (разложения, гниения, брожения) экскрементов и других органических отходов.

9.2. Уменьшение выделения в атмосферу вредных и дурнопахнущих газов

9.2.1. Животноводческие комплексы как источники загрязнения атмосферы [279,280]

Исследованиями различных авторов установлено, что основным источником образования вредных газов и запахов на животноводческих предприятиях являются экскременты – навоз (в процессе его поступления, транспортировки, хранения, обработки и утилизации). Нативный навоз сразу после поступления начинает очень быстро эволюционировать в сторону анаэробных процессов, которые включают в себя кислое брожение и его регрессию, а также щелочное брожение.

В результате кислого брожения внеклеточные ферменты гидролизуют углеродный комплекс на простой сахар, протеины и аминокислоты, жиры и жирные кислоты (уксусную, масляную, протеиновую).

В процессе регрессии кислого брожения органические кислоты и растворимые азотистые соединения разлагаются на аммиак, амины, углекислый газ и уголекислоту, азот, метан, водород. При этом возрастает рН среды и образуются сероводород, индол, скатол и меркаптаны.

В ходе щелочного брожения органические кислоты распадаются на углекислый диоксид и метан. В итоге, в окружающую среду (помимо основных газов: метана (CH₄), аммиака (NH₃), сероводорода (H₂S), диоксида углерода (CO₂), выделяются еще 27 газовых соединений, принадлежащих к группе аминов, амидов, спиртов, дисульфидов, сульфидов и меркаптанов.

В особую группу следует выделить соединения, придающие запах навозу, и которые можно классифицировать следующим образом: - серные летучие (меркаптаны, индол, сканол, сульфиды, дисульфиды, амины, сероводород); - кислоты (масляная и уксусная); - щелочь (аммиак); - углеродные (формальдегид, уксусный альдегид); - спирты (этанол, метанол, пропанол, бутанол).

При этом особо следует отметить, что отравляющие свойства и основные запахи возникают в результате присутствия в воздухе сероводорода, аммиака, индолов и сканолов, а также меркаптанов. Эти газы оказывают вредные физиологические воздействия на животных и человека, вызывая, кроме чувства отвращения, головную боль, тошноту, поверхностное дыхание, которое ведет к уменьшению легочной вентиляции и, следовательно, к ослаблению окислительных процессов в организме, нарушению функций органов дыхания, обонятельного анализатора, центральной нервной системы.

Согласно данным Сибирского НИИ «Сельхозстрой» из свиного комплекса производительностью 108 тыс. голов в год в атмосферу еже часно поступает 1,5 млрд. микробных тел, 159 кг аммиака, 14,5 кг сероводорода, 2,5 кг пыли [279,280]. В воздухе свиноводческих помещений

вместимостью от 1 до 6 тыс. голов содержится пыли – от 0,18 до 3,5 мг/м³, микробов – от 15,4 до 401,8 тыс./м³, аммиака – от 6,5 до 21,2 мг/м³, сероводорода – от 0,9 до 2,0 мг/м³.

Существенное влияние на чистоту атмосферного воздуха оказывают очистные сооружения животноводческих комплексов, особенно свино-комплексов, с накопителями для сточных вод, активного или сырого осадка. За один час количество аммиака и сероводорода, выделяемое очистными сооружениями в летнее время, составляет 194,5 и 66,5 кг соответственно.

В воздухе закрытых помещений, особенно с подпольными накопителями навоза, содержится большое количество вредных и дурнопахнущих газов, которые при концентрациях выше предельно-допустимых (ПДК), оказывают сильное токсическое действие на организм животных. Это является причиной их повышенной заболеваемости, снижения продуктивности и увеличения падежа.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки эффективных технологий и оборудования по улучшению экологической обстановки на крупных и средних животноводческих комплексах. Ряд государств (США, Япония и др.) имеют национальные программы для решения этих проблем.

Известны два основных способа создания соответствующего санитарным нормам микроклимата в животноводческих помещениях. Первый и наиболее распространенный из них – принудительная вентиляция, которая обеспечивает выброс загрязненного воздуха из помещения с полной или частичной его очисткой от вредных примесей.

В основу второго способа положена обработка навоза и навозных стоков различными реагентами. Поскольку, как было показано ранее, запах от навоза создается смесью выделяемых газов (аммиака, меркаптанов, аминов, органических кислот и т. д.), существующие методы обработки навозных стоков в основном направлены на их дезодорацию и, как следствие этого, защиту воздушного бассейна. Одним из традиционных и широко известных способов дезодорации навозных стоков является их аэрация. Так, в США для очистки и дезодорации навозных стоков довольно широко применяют окислительные траншеи, сооруженные полностью или частично под настилом решетчатых полов животноводческих помещений. Особенностью таких траншей является наличие в них роторных аэраторов, которые обеспечивают аэрацию в процессе передвижения стоков по траншее со скоростью 0,3 м/с.

Активизация процесса аэрации навозных стоков путем применения озона считается весьма перспективной ввиду его высокого окислительного потенциала. Применение озона, при концентрации 150-200 мг/л, для доочистки сточных вод свиноводческих промышленных комплексов позволяет обеспечить не только обеззараживание и устранение запахов, но и стабильность биологического потребления кислорода в диапазоне 16-19 г/л. Озон и перекись водорода, как мощные окислители, способствующие

обезвреживанию и дезодорации навоза, широко используются в Великобритании и Франции.

Однако, к наиболее многочисленной группе методов дезодорации навоза следует отнести его обработку реагентами различной химической природы. Большинство этих методов основано на том, что химические реагенты вступают в реакцию с веществами, находящимися в навозе, связывая или разлагая их. Это предотвращает выделение загрязнений и запахов в окружающую среду. Кроме этого, некоторые реагенты уничтожают бактерии, в том числе и те, которые вызывают гнилостные аэробные процессы, сопровождающиеся выделением вредных газов – аммиака, сероводорода, меркаптанов и т. д.

Институтом ветеринарной санитарии Российской Федерации, в целях дезодорации и обезвреживания, предложен метод обработки навоза формальдегидом. При этом, в процессе исследований, получен высокий эффект дезодорации и обеззараживания при содержании формальдегида 0,04 – 0,3 % от объема навоза при времени контакта компонентов до 72 часов и гомогенизации в течение 6 часов.

Кроме вышеупомянутых выше реагентов, на животноводческих предприятиях выделение вредных и дурно-пахнущих газов можно уменьшить или полностью ликвидировать посредством добавления в навоз гашеной извести, обработки раствором перманганата калия (в дозе 1% к массе навоза), едкого натра (0,9%), хлорида натрия (8%), персульфата аммония – 15 кг на 1 т жидкого навоза и т. д.

Однако, следует отметить, что такая обработка требует тщательного перемешивания (гомогенизации) навоза для усиления его контакта с реагентами. С этой целью навозоаккумуляторы, навозосборники, навозохранилища должны быть оборудованы устройствами для перемешивания с использованием насосов, механических мешалок и т.д.

9.2.2. Оценка риска при загрязнении атмосферного воздуха аммиаком [7,276]

Крупные животноводческие комплексы являются мощными источниками выделения загрязняющих веществ. Наибольшую опасность отходы животноводства представляют для водных источников и почвы. Однако, наряду с этим, животноводческие предприятия оказывают также отрицательное воздействие на качество атмосферного воздуха.

В воздухе животноводческих помещений выявлено больше 20 различных газов, среди которых, в первую очередь, следует выделить: аммиак, сероводород, меркаптаны, метан и др., которые вредно влияют на здоровье людей и снижают продуктивность животных. По мнению ученых, специалистов животноводства и технологов, продуктивность животных на 50-60 % определяется кормами, на 15-20 % - уходом и на 10-30 % -

микроклиматом в животноводческом помещении. Отклонение параметров микроклимата от установленных норм приводит к сокращению удоев молока на 10-20 %, уменьшению прироста живой массы - на 20-33 %, увеличению падежа молодняка до 5-40 %, уменьшению яйценоскости кур - на 30-35 %, дополнительному расходу кормов, сокращению срока службы оборудования, машин и самих зданий, снижению устойчивости животных к заболеваниям.

Кроме этого, следует отметить, что вредные и дурнопахнущие газы весьма опасны для людей, которые работают в животноводческих помещениях. Из таких газов особо следует выделить аммиак. Это связано с тем, что диоксид углерода и сероводород, имеющие большой удельный вес, в основном накапливаются внизу (до 0,5 м от пола) — в зоне размещения животных и птиц, а также в навозосборниках. В тоже время аммиак, как более легкий газ, находится в верхней зоне помещений (1,5 м от пола и выше). По природе своего действия на организм человека аммиак относится к удушающим (из группы хлора) газам, но в отличие от них вызывает более ярко выраженную воспалительно-некротическую патологию. Аммиак, смешиваясь с водой, образует щелочь, которая вызывает химические ожоги слизистых оболочек и кожи. При непрерывном и длительном воздействии аммиака, с повышенной его концентрацией в воздухе, ухудшается общее состояние организма, наблюдается снижение уровней гемоглобина и эритроцитов в крови, а также ухудшение функции пищеварительного тракта.

Проведенные предварительные исследования показали, что в воздухе животноводческих помещений содержание аммиака может в десятки раз превышать предельно-допустимую концентрацию (ПДК).

Аммиак относится к неканцерогенным веществам. Международная методология оценки риска предусматривает, что для неканцерогенных веществ и канцерогенов негенотоксического действия предусматривается наличие пороговых уровней, ниже которых вредные эффекты не возникают.

Для характеристики риска развития неканцерогенных эффектов устанавливаются уровни минимального риска - референтные дозы (RfD) и референтные концентрации (RfC). При отсутствии показателей референтных доз и концентраций можно использовать предельно допустимые концентрации (ПДК). Превышение референтной дозы не обязательно связано с развитием вредного эффекта, но чем выше доза влияния и чем больше она превышает референтную, тем больше вероятность его возникновения.

В табл. 9.1 приведены основные нормированные характеристики содержания аммиака в воздухе.

Здесь ПДК_{с.с.}, ПДК_{р.з.}, ПДК_{м.р.} - предельно-допустимые концентрации: среднесуточная, в рабочей зоне, максимально-разовая, соответственно.

Таблица 9.1

Безопасный уровень воздействия и ПДК для аммиака в воздушной среде

Название вещества	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	ПДК _{р.з.} , мг/м ³	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	RfC при ингаляционных воздействиях, мг/м ³	
				хронических	кратковременных
Аммиак(NH ₃)	0,04	20	0,2	0,1	0,35

Оценку риска развития неканцерогенных эффектов осуществляют путем сравнения фактических уровней экспозиции с безопасными уровнями влияния и определением коэффициента опасности:

$$HQ = AD/RfD \text{ или } HC = AC/RfC, \quad (9.1)$$

где HQ - коэффициент опасности; AD - средняя доза, мг/кг; AC - средняя концентрация, мг/м³; RfD - референтная доза, мг/кг; RfC - референтная концентрация, мг/м³.

В случае отсутствия референтных доз, как эквивалент можно использовать граничные допустимые концентрации или концентрации, которые установлены по критерию прямого эффекта на здоровье.

В соответствии с методикой оценки риска, при ингаляционном воздействии вещества из атмосферного воздуха, среднесуточная доза (AD) определяется по формуле:

$$AD = (((Ca \cdot Tout \cdot Vout) + (Ch \cdot Tin \cdot Vin)) \cdot EF \cdot ED) / (BW \cdot AT \cdot 365), \quad (9.2)$$

где AD - среднесуточная доза вещества, мг/кг-сутки; Ca - концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м³; Ch - концентрация вещества в воздухе помещения, мг/м³; $Tout$ - время, проводимое человеком вне помещения, ч/сутки; Tin - время, проводимое в помещении, ч/сутки; $Vout$ - скорость дыхания вне помещения, м³/ч; Vin - скорость дыхания в помещении, м³/ч; EF - частота воздействия, дней/год; ED - длительность воздействия, лет; BW - масса тела, кг; AT - период осреднения экспозиции, лет; 365 - число дней в году.

На основе анализа ранее проведенных работ и с использованием данных, полученных в результате обследования производственных помещений агрокомбината «Углегорский» (в настоящее время свинокомплекс «Бахмутский аграрный союз»), для проведения расчетов были определены значения концентраций аммиака: $Ca = 0,2$ мг/м³ (в пределах санитарно-защитной зоны), $Ch = 15$ мг/м³. Значения остальных параметров были выбраны для взрослого мужчины при условии продолжительности его рабочего дня 8 часов и стаже работы 10 лет.

В результате расчета было получено, что значение среднесуточной дозы аммиака $AD = 2,37$ мг/м³, а референтная суточная доза:

$$RfD = RfC \frac{Vin}{BW} = 0,02 \frac{\text{мг}}{\text{кг}}, \quad (9.3)$$

Используя полученные значения AD и RfD определим величину коэффициента опасности для аммиака в свиноводческих помещениях:

$$HQ = 2,37/0,02 = 118,5. \quad (9.4)$$

Полученное значение коэффициента опасности соответствует очень высокой степени риска при ингаляционном воздействии аммиака на организм человека и требует принятия безотлагательных мер по улучшению микроклимата в обследованных животноводческих помещениях.

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения выделения аммиака и других вредных газов из навоза может быть применение водорастворимых полимерных композиций на основе ПЭО и ПАА, а также их смесь с едким натрием, растворами которых целесообразно заполнять каналы под решетчатыми полами свиноводческих помещений.

9.2.3. Результаты предварительных экспериментальных исследований [75,275,277]

В основу разработанного способа положена локализация (нейтрализация) самого источника загрязнения, вызываемого разложением органических отходов. Это достигается за счет уменьшения скорости биохимических реакций их разложения, что позволяет свести к минимуму объем выделяемых при этом газов. Применение такого способа, наряду с другими мероприятиями, такими, как своевременное удаление навоза из помещений, плановая замена подстилки, эффективное использование вентиляции, позволит создать нормальный микроклимат в помещениях, где содержатся животные.

Предварительными исследованиями было установлено, что на скорость биохимических реакций разложения, находящихся в воде (или смоченных водой) органических отходов, в том числе и навоза, эффективно влияют добавки высокомолекулярных полимеров – ПЭО и ПАА. В основе этого воздействия лежит создание на поверхности разлагающихся частиц защитной пленки из макромолекул ВМП, которые предварительно вводятся в воду, предназначенную для заполнения траншей-навозоаккумуляторов.

В настоящем разделе приведены результаты исследований по выбору наиболее эффективных добавок ВМП и композиций на их основе, применение которых в процессе гидросмыва навоза, при содержании животных над навозоаккумуляторами приводило бы к уменьшению скорости биохимической реакции его разложения и, как следствие этого, улучшению микроклимата в помещениях, где содержатся животные.

Экспериментальные исследования проводились с использованием навозных стоков совхоза – комбината «Углегорский» (Донецкая обл.). В основу исследований было положено измерение давления над образцами навозных стоков (до и после введения полимеров) в закрытых емкостях. При

этом предполагалось, что увеличение давления в емкости пропорционально скорости биохимической реакции и объему выделившихся в процессе ее протекания вредных и дурно-пахнущих газов.

В ходе эксперимента, в емкости объемом 750 мл загружали по 400 мл свиной навозной жижи. В эти же емкости (кроме одной контрольной) вводили микродобавки ВМП – ПЭО, ПАА и их смеси в количестве (1,5-3,0) мг на один литр навозного стока. Через определенные промежутки времени, с помощью дифференциальных манометров, измеряли разность ΔP между давлением в емкости и атмосферным давлением. Эта разность зависит от интенсивности биохимической реакции разложения навоза. По полученным экспериментальным данным строили кривую зависимости ΔP от времени протекания биохимической реакции τ . Величину избыточного давления в сосуде, обусловленного биоразложением органических веществ, можно записать в виде:

$$\Delta P = cw\Delta\tau, \quad (9.5)$$

где w - скорость биохимической реакции, $\Delta\tau$ – промежуток времени, за который давление в сосуде увеличивается на величину ΔP , c – постоянная. Отсюда легко определить скорость биохимической реакции как тангенс угла наклона касательной к кривой $\Delta P = f(\tau)$. Данные экспериментальных исследований приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Зависимость избыточного давления ΔP в герметически закрытых емкостях от времени τ протекания биохимической реакции разложения свиного навоза в воде, водных растворах ПЭО, ПАА и их смеси

№п/п	Используемая жидкость	Время выдержки образцов τ , мин									
		20	60	100	140	180	220	260	300	340	380
		Величина избыточного давления ΔP , см. вод. ст.									
1.	Вода	16	38	59	75	87	98	107	114	122	128
2.	Водный раствор ПЭО (концентрации 2,5 мг/л)	11	15	18	20	20	20	20	20	20	20
3.	Водный раствор ПАА	10	16	25	30	34	40	44	48	53	55
4.	Водный раствор смеси ПЭО и ПАА (1,5 мг/л и 1,5 мг/л)	10	14	23	28	32	37	40	45	47	49

Из приведенных данных видно, что для всех образцов, содержащих микродобавки полимеров, давление над навозной жижей, за счет выделения в ходе биохимической реакции газов, значительно меньше по сравнению с контрольным образцом, который характеризует разложение навоза в воде. Так, например, на 60 минуте давление в емкости, за счет разложения навоза в воде (эксперимент № 1), составляет 38 см водяного столба. В тоже время

при разложении навоза с добавкой 2,5 мг ПЭО на 1 л стока (эксперимент № 2) выделяемые газы создали давление в емкости равное 15 см водяного столба, что в 2,5 раза меньше. С течением времени скорость разложения навоза в воде продолжает интенсивно нарастать – на 140 минуте давление в сосуде становится равным 75 см водяного столба. В тоже время, для стока, обработанного ПЭО, давление составило 20 см водяного столба. Дальнейшее увеличение времени выдержки исследуемых образцов до 380 минут показало, что в стоке с ПЭО давление осталось без изменений – 20 см водяного столба, а разложение навоза в воде привело к увеличению давления до 128 см водяного столба. Аналогичные данные получены для водных растворов ПАА и смеси ПАА с ПЭО (эксперименты №3 и №4). При этом установлено, что эффективность этих составов в 2-3 раза меньше по сравнению с добавкой одного полиэтиленоксида.

Проверка эффективности воздействия добавок ПЭО на биохимическую реакцию разложения навоза во времени показала, что она сохранялась при содержании полимера (2,5 мг на 1 л стока) в течении 6 суток (в ходе проведения эксперимента).

9.2.4. Композиция на основе ПЭО для обработки навоза [7,278]

Одним из наиболее распространенных методов дезодорации навоза является его обработка реагентами различной химической природы. При этом, согласно данным Burneft и Dondero, получают удовлетворительные результаты.

При выполнении экспериментальных исследований была поставлена задача усовершенствовать состав композиции для обработки навоза за счет введения в нее добавок, которые уменьшают скорость биохимической реакции его разложения.

Поставленная задача решалась за счет того, что в композицию для обработки навоза, которая включает едкий натрий и воду, дополнительно ввели высокомолекулярный (молекулярная масса $6 \cdot 10^6$) полиэтиленоксид (ПЭО) при следующем соотношении компонентов (в мас. ч.): едкий натрий - 0,9; высокомолекулярный полиэтиленоксид (молекулярная масса $6 \cdot 10^6$) - (0,0002-0,0005), вода - 100. Данные экспериментальные исследований, которые были получены с использованием описанной в п. 9.2.3 методике, приведены в табл. 9.3.

Сравнение эффективности растворов образцов композиций, приготовленных по предложенному (примеры 2,4,5) и известному (пример 3) способам, показывает, что для образцов, содержащих микродобавки полимеров, давление над жидким навозом, за счет выделения в ходе биохимической реакции газов, значительно меньше по сравнению с контрольным образцом (пример 1), который характеризует разложения

навоза в воде без добавок реагентов. Так, например, на 60 минуте давление в емкости, за счет разложения навоза в воде (эксперимент № 1), составляет 38 см водяного столба. В то же время при разложении навоза с добавкой 2,5 мг ПЭО на 1 л стока (эксперимент № 2) выделяемые газы, увеличили давление в емкости только до 15 см водного столба, что в 2,5 раз меньше. В примере 2 (прототип) на 60 минуте давление в емкости составило 22 см водного столба, что в 2,2 раза больше, чем в предлагаемой композиции (пример 4).

Таблица 9.3

Влияние времени выдержки образцов навоза (до и после обработки реагентами) на величину избыточного давления, создаваемого выделением вредных и дурнопахнущих газов

№ п/п	Испытываемая жидкость	Время выдержки образцов t , мин									
		20	60	100	140	180	220	260	300	340	380
		Величина избыточного давления ΔP , см вод. ст.									
1	Вода	16	38	59	75	87	98	107	114	122	128
2	Водный раствор ПЭО (2,5 мг/л)	11	15	18	20	20	20	20	20	20	20
3	Водный раствор едкого натра (9 г/л)	14	22	31	38	43	46	48	50	51	51
4	Водный раствор смеси ПЭО (2,5 мг/л) и едкого натра (9 г/л)	8	10	11	12	12	12	12	12	12	12
5	Водный раствор смеси ПЭО (2,5 мг/л) и едкого натра (4,5 г/л)	9	11	11	11	12	12	12	12	12	12

Со временем скорость разложения навоза в воде продолжает интенсивно нарастать - на 140 минуте давление в сосуде становится равным 75 см водного столба. В то же время, для стока, обработанного ПЭО, давление составил 20 см водного столба, для стока обработанного раствором едкого натрия - 38 см водного столба, для смеси ПЭО и едкого натрия - 12 см водного столба.

Дальнейшее увеличение времени выдержки исследуемых образцов до 380 минут показало, что в стоке с ПЭО давление осталось без изменений - 20 см водного столба, для прототипа - 51 см водного столба, для разработанной композиции давление составило 12 см водного столба, а разложение навоза в воде увеличило давление до 128 см водного столба.

Результаты примера 5 показывают, что введение в состав композиции микродобавок высокомолекулярного ПЭО позволяет уменьшить концентрацию едкого натрия в композиции в два раза. Сравнение величин избыточного давления, которое является следствием выделения вредных газов при разложении отходов жизнедеятельности животных показывает, что в примерах 4 и 5 они одинаковы. Это позволяет упростить процесс обработки навоза химическими реагентами и уменьшить затраты на приобретение едкого натрия. Уменьшение содержания ПЭО в композиции ниже 2 мг/л приводит к значительному увеличению скорости биохимической реакции разложения навоза. Увеличение концентрации

ПЭО больше 5 мг/л существенно не изменяет скорость биохимической реакции и с экономической точки зрения, считается нецелесообразным.

Уменьшение содержания едкого натрия в композиции ниже 1,4 г/л не приводит к требуемому результату. Увеличение концентрации едкого натрия больше 4,5 г/л не изменяет скорость биохимической реакции и с экономической точки зрения также считается нецелесообразным.

9.3. Очистка навозных стоков свиноводческих комплексов от твёрдых примесей и уплотнение образовавшегося осадка

9.3.1. Применение высокомолекулярных ПЭО и ПАА в процессах флокуляционной очистки сточных вод

Среди промышленных флокулянтов, как по практическому применению, так и по объёму производства, ведущее место занимает ПАА. Это обусловлено его невысокой стоимостью, достаточно высокой эффективностью во многих флокуляционных процессах и др.

Незамещенная амидная группа ПАА легко подвергается химическим превращениям. Путем ее омыления щелочью получают анионные флокулянты, а по реакции Манниха — флокулянты катионного типа.

Среди водорастворимых гетероцепных кислородсодержащих полимеров наибольшее практическое значение имеет ПЭО. Его интенсивное использование начинается с 50-х годов прошлого столетия, когда удалось синтезировать высокомолекулярные образцы полимера.

Важное преимущество ПЭО, как неионогенного флокулянта, заключается в отсутствии заметной зависимости его флокулирующей способности от рН раствора и знака заряда частиц дисперсной фазы. Флокулирующее действие ПЭО возрастает с увеличением степени полимеризации образца. ПЭО применяется в качестве флокулянта в бумажной промышленности, в водоочистке, для интенсификации процессов флотационного углеобогащения, сгущения пульпы и обезвоживания осадков.

Особенностью ПЭО является его способность образовывать легко разрушаемые при перемешивании флокулы вследствие слабой адсорбции макромолекул на поверхности частиц. Это свойство полимера может быть полезным для процессов, где необходимо получать сравнительно легко редуцируемые флокулы.

9.3.2. Очистка навозных стоков свинокомплексов модифицированным полиакриламидом (МПАА) [7,75,277]

На ряду с созданием нормального микроклимата в животноводческих помещениях и защитой атмосферного воздуха от загрязнений к экологическим проблемам крупных животноводческих комплексов следует

отнести очистку навозных стоков от твердых примесей. Обычно на таких объектах удаление навоза производят гидросмывом, т. к. в отличие от других известных способов он отличается простотой, пониженной трудоемкостью, эффективен в санитарном отношении. Однако, в процессе гидросмыва образуется очень большое количество высококонцентрированных, трудноокисляемых, биологически активных стоков. На животноводческом комплексе при выращивании 108 тыс. свиней в год образуется свыше 1 млн. м³ навозных стоков, которые представляют значительную угрозу окружающей среде. Такие стоки имеют слабощелочную или нейтральную реакцию, являются сложными дисперсными системами, их прозрачность близка к нулю, содержание взвешенных веществ лежит в пределах (6-15) г/л, биологическое потребление кислорода (БПК₅) может достигать 24 г О₂/л.

В качестве примера в табл. 9.4 приведен фракционный состав (в вес. %) твердых включений свиного навоза, образующегося при кормлении свиней кормами заводского производства и приготовленными непосредственно в хозяйстве.

Из приведенных данных видно, что в навозе содержится очень большое количество частиц с размерами до 1,0 мм. Так при кормлении свиней кормами заводского производства их содержание в среднем равно 63%. В случае, когда животные питаются кормами, приготовленными непосредственно в хозяйстве, содержание частиц такой фракции меньше 42%. Следует также отметить, что в обоих случаях навозные стоки образуют седиментационно и агрегативно устойчивые дисперсии.

Таблица 9.4

Фракционный состав твердых включений свиного навоза

№п/п	Размер частиц, мм	Содержание частиц в навозном стоке (вес.%) при кормлении свиней кормами	
		Заводского производства	Приготовленными в хозяйстве
1	0,05 – 0,1	14,9	8,0
2	0,1 – 0,5	25,0	19,8
3	0,5 – 1,0	23,3	14,5
4	1,0 – 2,0	17,8	29,8
5	2,0 – 5,0	12,0	21,4
6	Больше 5,0	7,0	6,5

Очистку сточных вод от взвешенных частиц можно проводить с применением специальных химических веществ (реагентов) – коагулянтов и флокулянтов, т.к. их действие связано с изменением агрегативной устойчивости стоков и образованием из грубодисперсных и коллоидных загрязнений крупных (с повышенной плотностью) быстрооседающих хлопьев и флокул.

В связи со строительством крупных животноводческих комплексов возникает и приобретает все большую остроту проблема уборки и утилизации жидкого навоза, объемы которого из года в год возрастают. При этом следует заметить, что такой навоз имеет влажность до 98%.

Механическую очистку жидкого навоза рекомендуется осуществлять на дуговых ситах и в вертикальных отстойниках. Осадок с дуговых сит и отстойников обезвоживают в специальных бункерах-обезвоживателях и в центрифугах. При этом осадок обеззараживают в буртах, а осветленный сток – в пароструйных аппаратах. Однако, как показывает практика, для реализации такой схемы очистки необходимо создавать специальные инженерные сооружения с последующим оснащением их громоздким и энергоемким оборудованием. Кроме этого, использование этой схемы обработки и утилизации отходов животноводства не обеспечивает очистку жидкой фракции до уровня, позволяющего сбрасывать ее в открытые водоемы или для орошения сельскохозяйственных культур на ограниченных площадях. Такой подход к решению проблемы особенно актуален для регионов с дефицитом использования чистой воды для разбавления навозных стоков, а также высокой стоимостью гидротехнического строительства.

В связи с вышеизложенным, в настоящее время во всех ведущих странах мира проводятся исследования по интенсификации процессов очистки навозных стоков с применением коагулянтов, флокулянтов и их смесей. Введение таких химических соединений в очищаемые жидкости приводит к изменению их агрегативной устойчивости и образованию из грубодисперсных и коллоидных загрязнений крупных, с повышенной плотностью флокул.

В последние годы в процессах очистки воды и промышленных стоков от твердых примесей широкое применение получили флокулянты. При этом наиболее перспективными являются катионактивные флокулянты – водорастворимые полимеры с большой молекулярной массой. Многочисленными исследованиями показано, что катионактивные флокулянты наиболее эффективны при очистке сточных вод, содержащих взвешенные органические примеси, имеющие отрицательный заряд.

Синтез катионактивных флокулянтов в промышленных масштабах связан с большими материальными затратами и для его реализации необходимо иметь соответствующую сырьевую базу. Считается целесообразным получать флокулянты, обладающие катионактивными свойствами, в виде водных растворов из сравнительно дешевых и распространенных полимеров, например, полиакриламида.

В монографии приведены результаты исследований по созданию основ технологии и необходимого для ее реализации комплекта оборудования для очистки сточных вод от органических загрязнений с применением модифицированного полиакриламида (МПАА), который

сравнительно легко получить из наиболее распространенного в Украине и в ближнем зарубежье полимера – технического полиакриламида путем полимераналогичных превращений. При этом получаемый флокулянт проявляет ярко выраженные катионактивные свойства (за счет модификации амидных групп), имеет слаборазветвленную структуру макромолекул, характеризуется высокой молекулярной массой, величина которой лежит в интервале $(2 - 4) \cdot 10^6$, отличается сравнительно малой оптимальной дозой и небольшим временем перемешивания со стоком. Однако, наряду с перечисленными выше преимуществами, получаемый МПАА имеет ряд недостатков. Так, например, получить МПАА можно только в виде (2,0-2,2)%-ных (по активному веществу) водных растворов, водородный показатель которых лежит в пределах $pH=(2,5-4)$. При этом срок хранения такого флокулянта не превышает 5 месяцев.

В связи с этим создаваемая в рамках настоящей работы технология предполагает приготовление МПАА непосредственно на месте его применения. С целью исключения коррозии оборудование, емкости для хранения флокулянта, смесители и трубопроводы, по которым он подается, должны быть изготовлены из нержавеющей стали или их внутренняя поверхность должна быть защищена кислотоупорными покрытиями.

Подробно технология приготовления модифицированного полиакриламида из ПАА описана в работе авторов Вейцер Ю.И. и др., которые получили катионактивный флокулянт ОКФ для подготовки осадков городских сточных вод к механическому обезвоживанию. В проведенных авторами данной монографии исследованиях стояла задача расширить границы применения катионактивного МПАА для очистки навозных стоков крупных свиноводческих комплексов, создать основы технологии его приготовления из выпускаемого в Украине технического полиакриламида.

Основные физико-химические свойства синтезированного и рекомендуемого к использованию МПАА приведены в табл. 7.5.

Важную роль в процессе очистки также играют технические характеристики оборудования, используемого для обработки сточных вод. Главной из таких характеристик является интенсивность перемешивания флокулянта со стоком, которая характеризуется среднеквадратичным градиентом скорости G .

Обычно величину G определяют по формуле

$$G = \sqrt{E / \eta V \tau}, \quad (9.6)$$

где E – работа, затрачиваемая на перемешивание; η – вязкость загрязненной воды; V – объем перемешиваемого стока; τ – время полного перемешивания.

Установлено, что величина среднеквадратичного градиента скорости при перемешивании модифицированного полиакриламида со стоком должна лежать в интервале $(200-350) \text{ c}^{-1}$.

Таблица 9.5

Физико-химические свойства модифицированного полиакриламида

№	Наименование контролируемого пар-ра	Ед. изм	Величина опр. пар-ра	Примечания
1.	Полимерсодержание	вес. %	(2,0 – 2,2)	Водный раствор
2.	Характеристическая вязкость	дл/г	(3,5 – 5)	В 10%-ном р-ре NaCl
3.	Плотность (при 25 ⁰ С)	г/см ³	(1,08 – 1,1)	
4.	Полнота растворения при перемешивании в воде: – на 20 сек – на 100 сек	вес. %	(80 – 85) (90 – 95)	
5.	Водородный показатель	ед	(2,5 – 4)	Вызывает коррозию черных и цветных металлов
6.	Рекомендуемая рабочая концентрация	вес. %	(0,01 – 0,02)	
7.	Время перемешивания со стоком	сек.	(20 – 40)	
8.	Интенсивность перемешивания	с ⁻¹	(200 – 350)	G – средний квадратичный градиент скорости
9.	Оптимальная доза	г/кг загрязне-ния	25 – 30	
10.	Срок хранения	мес.	Не более 5	
11.	ПДК	мг/л	2	При условии отсутствия в растворе МПАА свободных формальдегида и вторичных аминов.

Оценка эффективности МПАА, как флокулянта, проводилась в два этапа с использованием стоков свиноводческого комплекса совхоза-комбината «Углегорский». На первом этапе в исходных стоках и в фильтрате, после обработки флокулянтom и фильтрования через сетку №11, определяли содержание взвешенных веществ, а также прозрачность фильтрата. Кроме этого, были определены коэффициент задержания взвешенных частиц при прохождении через сетку и влажность образующегося осадка. Данные по флокулирующей способности МПАА приведены в табл. 9.6.

Из приведенных в таблице данных видно, что обработка стока флокулянтom существенно улучшает процесс очистки. Так, например, после обработки стока флокулянтom (при концентрации МПАА 30 г на 1 кг загрязняющих веществ) и фильтрования через сетку № 11 содержание взвешенных веществ уменьшается с 13000 мг/л до 150 мг/л. При этом коэффициент задержания взвешенных частиц увеличивается с 13 % до 98,5 %. Улучшается также такой показатель как влажность образующегося

осадка, т.к. в исходном стоке она была равна 98,5 %, а после обработки флокулянтom уменьшилась до 75 %.

Таблица 9.6

Данные экспериментальных исследований по очистке навозных стоков МПАА

№ п/п	Основные характеристики		Экспериментальные данные
1.	Влажность осадка, %	В исходном стоке	98,5
		После обработки флокулянтom и фильтрования	75
2.	Взвешенные вещества, мг/л	В исходном стоке	13000
		В фильтрате после обработки флокулянтom и фильтрования	150
3.	Коэффициент задержания взвешенных частиц, %	В исходном стоке	13
		После обработки флокулянтom и фильтрования	98,5
4.	Прозрачность фильтрата, %	В исходном стоке	0
		После обработки флокулянтom	35

На втором этапе были проведены исследования по определению кинетики седиментации твердых частиц в стоках свиноводческого комплекса до и после обработки флокулянтom, с дозой 30 г МПАА на 1 кг загрязняющих веществ. Результаты экспериментальных данных приведены на рис. 9.1.

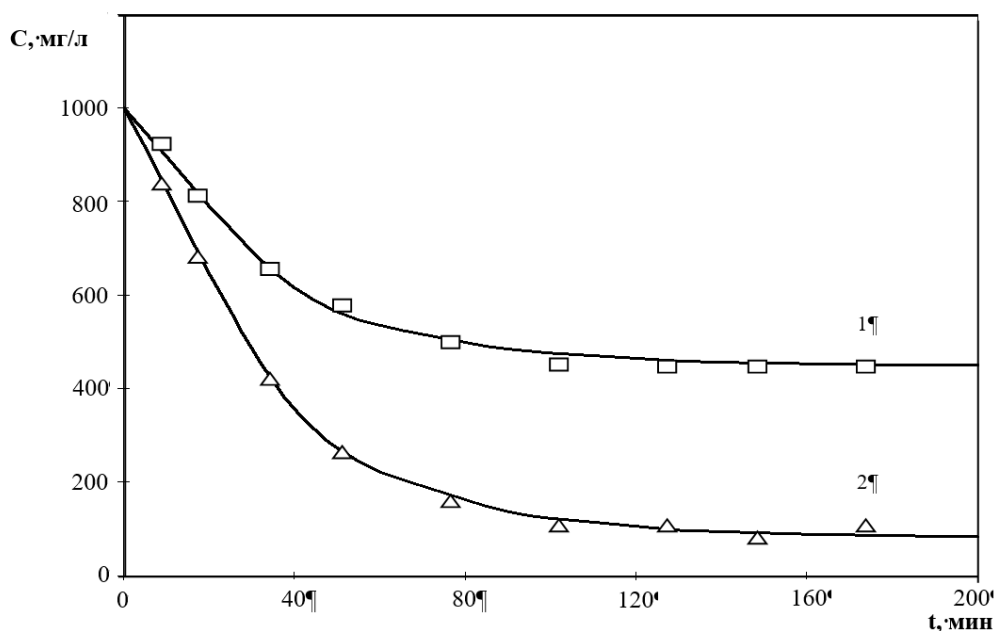


Рисунок 9.1 Кинетика осаднения твердых частиц в стоке свиноводческого комплекса до (кривая 1) и после обработки (кривая 2) с дозой 30 г МПАА на 1 кг загрязняющих веществ

Из приведенных на рис. 9.1 зависимостей видно, что при отстаивании в течении трех часов в исходном стоке содержание взвешенных частиц уменьшается с 1000 мг/л до 500 мг/л . В тоже время обработка навозного стока флокулянтom, при таком же времени выдержки, уменьшает концентрацию взвешенных частиц до 80 мг/л . Это позволяет значительно улучшить работу существующих очистных сооружений, а также создать новое, более совершенное оборудование для очистки навозных стоков [281].

9.4. Перспективы применения ершей и флокулянтов для очистки сточных вод

Одним из эффективных способов очистки сточных вод также может быть применение очистных камер с волосяными ершами и аэрационными трубами. Результаты численных расчетов, проведенных в ГОУ ВПО «ДонНАСА» совместно с ГОУ ВПО «ДонНУ», показали, что изменение плотности примесей в очистной камере уменьшается по степенному закону. На скорость убывания примеси сильно влияет количество волос в единице объема и плотность пузырьков воздуха. Формулы и рисунки представлены в [282].

Изучение совместного влияния процесса флокуляции, гирлянд из волосяных ершей и аэрации на процесс очистки сточных вод показало, что за счет применения флокулянтов загрязняющие частицы будут укрупняться, а, следовательно, будут эффективнее задерживаться волосами ершей. Барботажный эффект, осуществляемый аэрационными трубами, будет препятствовать оседанию образовавшихся флокулов на дно канала. Таким образом очистка загрязненной жидкости будет осуществляться эффективнее, что позволит уменьшить длину очистного канала и сократить время очистки [283].

Раздел 10. Сопротивление трения и теплообмен в турбулентных потоках водных растворов ВМП и МПАВ

При гидродинамическом проектировании систем тепло- и холодоснабжения, а также теплообменных аппаратов различного назначения (кожухотрубных теплообменников, воздухоохладителей, радиаторов и т.д.) необходимо учитывать основные закономерности процессов теплопередачи. [17,284-286]

Важным резервом повышения эффективности работы централизованных систем подачи тепла и холода может быть использование явления снижения ГСТТ тепло- и хладоносителей в напорных трубопроводах. Однако, введение в турбулентные потоки жидкостей добавок ВМП и МПАВ не только приводит к существенному снижению ГСТТ, но и к уменьшению интенсивности турбулентного тепло- и массопереноса. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния гидродинамически-активных добавок на процессы переноса тепла и холода в теплообменниках аппаратах.

10.1. Краткие теоретические сведения по теплофизике

10.1.1. Основные теплофизические параметры [286]

К основным теплофизическим параметрам относятся температура, теплота, работа, мощность, теплоемкость, тепловое расширение, плотность, объемный и удельный вес, вязкость.

Температура. Для определения степени нагретости тел пользуются понятием температуры. Температура характеризует тепловое состояние тела, но не определяет количества тепловой энергии в нем. Температура измеряется в условных единицах – градусах. Существует несколько температурных шкал:

- 1) Термодинамическая (Кельвина - $^{\circ}K$);
- 2) Международная практическая (Цельсия - $^{\circ}C$);
- 3) Фаренгейта ($^{\circ}F$);
- 4) Рэнкина ($^{\circ}R$);
- 5) Реомюра ($^{\circ}P$).

В международной системе единиц СИ (ГОСТ 8.417-81) в качестве единицы измерения температуры по термодинамической температурной шкале принят градус Кельвина. Для тройной точки воды (равновесие воды в твердой, жидкой и газообразной фазе) установлено значение $273,16^{\circ}K$.

Теплота, работа, мощность. Энергия непрерывно движущихся молекул тела является тепловой энергией. При подводе тепловой энергии движение молекул ускоряется и сопровождается увеличением температуры. Понижение температуры и замедление движения молекул происходит при отводе тепловой энергии.

По ГОСТ 8.417-81 тепловая энергия (теплота) измеряется единицами работы и энергии – Джоулями (Дж).

До введения ГОСТ 8.417-81 за техническую единицу теплоты принималось количество тепла, необходимое для нагревания при атмосферном давлении 1 кг воды от 14,5 до 15,5°C, носившее название килокалория.

Теплоемкость. Различные вещества требуют разного количества тепла для нагревания до одинаковой температуры. Эта особенность веществ характеризуется удельной теплоемкостью, т. е. количеством тепла, необходимым для нагрева единицы количества вещества на единицу температуры.

Различают удельную теплоемкость при постоянном давлении c_p и удельную теплоемкость при постоянном объеме c_v .

Средней теплоемкостью c_m называют теплоемкость, определенную в конечном интервале температур,

$$c_m = \frac{q}{t_2 - t_1},$$

где q – количество тепла, необходимое для нагревания единицы количества вещества; t_2 , t_1 – соответственно конечная и начальная температура интервала.

Для расчетов с жидкостями пользуются удельной теплоемкостью при постоянном давлении c_p , опуская индекс. Удельные теплоемкости не постоянны, а изменяются в зависимости от температуры. Удельная теплоемкость измеряется единицами *дж/кг·град* или *ккал/кг·град* (весовая теплоемкость).

Теплоемкость, например, для нефтепродуктов, с достаточной для практических целей точностью, можно вычислить по эмпирической формуле Крагоэ для нефтепродуктов плотностью меньше $0,9 \text{ г/см}^3$ и по формуле Крауссольда для нефтепродуктов плотностью больше $0,9 \text{ г/см}^3$:

Формула Крагоэ:

$$c_p = \frac{0,415}{\sqrt{\rho}} + 0,0009 \cdot (t - 15) . \quad (10.1)$$

Формула Крауссольда:

$$c_p = 0,937 - 0,56\rho + 0,0011 \cdot (t - 15) , \quad (10.2)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении *ккал/кг·град*; ρ – плотность при 15°C, *г/см*³; t – температура, °C.

Если теплоемкость измеряется в *дж/кг·град*, то

$$c_p = \frac{55000}{\sqrt{\rho}} + 3,77 \cdot (t - 15) \text{ для } \rho \leq 900 \text{ кг/м}^3 \quad (10.3)$$

и

$$c_p = 3920 - 2,34\rho + 4,6(t - 15) \text{ для } \rho > 900 \text{ кг/м}^3 . \quad (10.4)$$

В английской системе единиц используется размерность *B.T.U./фунт·°F* или в единицах *Chu* (Centigradeheateunit), которая равна количеству тепла, необходимому для нагревания одного фунта воды на 1°C . Соотношения между различными единицами теплоемкостей таковы: $1 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град} = 4187 \cdot \text{дж/кг}\cdot\text{град}$; $1 \text{ Chu} = 1,8 \text{ B. T. U.}$ и $1 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град} = 1 \text{ B.T.U./фунт}\cdot\text{°F}$.

Теплоемкость воздуха при атмосферном давлении в интервале температур $0 - 60^\circ\text{C}$ составляет $1005 \text{ дж/кг}\cdot\text{град}$ или $0,24 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$.

Теплопроводность и коэффициент теплопроводности. Теплопроводность – это процесс передачи тепла между непосредственно соприкасающимися телами или частями тела. Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , который зависит от вещества, температуры и давления. Теплопроводность масел с повышением температуры от 0 до 120°C понижается в линейной зависимости. Коэффициент теплопроводности измеряется в $\text{вт/м}\cdot\text{град}$ или $\text{ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{град}$.

Тепловое расширение. Все тела при нагревании расширяются. Для жидкостей наибольший практический интерес представляет изменение объема. Объем, который займет жидкость при нагревании до температуры t , определяется выражением

$$V_t = V_0(1 + \beta\Delta t) , \quad (10.5)$$

где V_t - объем при температуре t ; V_0 - объем при начальной температуре t_0 ; β - коэффициент объемного расширения, $1/\text{град}$; Δt – разность температур $t - t_0$.

Коэффициенты объемного расширения для нефтепродуктов зависят от удельного веса.

Коэффициент объемного температурного расширения воздуха в интервале температур $0 - 100^\circ\text{C}$ равен $0,00367 = 1/273 \text{ 1/град}$.

Для твердых тел кроме коэффициента объемного расширения рассматривается коэффициент линейного расширения α .

Изменение линейного размера тела подсчитывается по формуле

$$l_t = l_0(1 + \alpha\Delta t) \text{ или } \Delta l = \alpha l_0 \Delta t , \quad (10.6)$$

где l_t – длина (линейный размер) при температуре t ; l_0 – линейный размер при начальной температуре t_0 ; Δl – изменение линейного размера тела; α – коэффициент линейного расширения, $1/\text{град}$.

Плотность, объемный вес, относительный удельный вес. Плотностью называется масса единицы объема:

$$\rho = \frac{m}{V} , \text{ кг/м}^3 , \quad (10.7)$$

где m – масса однородного тела, кг ; V – объем данного тела, м^3 .

Удельным весом называется отношение веса вещества к занимаемому объему:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \text{ Н/м}^3, \quad (10.8)$$

где G – вес данного однородного тела.

Между плотностью и удельным весом существует зависимость. Так как $G = mg$,

$$\gamma = \rho g, \quad (10.9)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/сек^2 .

Относительный удельный вес – это отношение веса данного тела к весу воды при $t=4$ °C в том же объеме. Относительный удельный вес – величина безразмерная.

Из определения относительного удельного веса следует, что:

$$\gamma = \gamma_{\text{в}} \delta_0 ; \rho = \rho_{\text{в}} \delta_0 . \quad (10.10)$$

Численные значения плотности и удельного веса совпадают.

Как удельный вес, так и плотность жидкостей довольно значительно изменяются при колебаниях температуры. Если известны плотность и удельный вес жидкости при некоторой другой температуре, можно, пользуясь нижеприведенными формулами, определить плотность и удельный вес при данной температуре:

$$\gamma_t = \frac{\gamma}{1 + \beta \Delta t} ; \rho_t = \frac{\rho}{1 + \beta \Delta t}, \quad (10.11)$$

где γ_t, ρ_t – соответственно удельный вес и плотность при данной температуре; γ, ρ – соответственно удельный вес и плотность при какой-либо известной температуре; β – коэффициент объемного расширения жидкости.

10.1.2. Теплоотдача и теплопередача. Теплопроводность [17,286]

Теплообмен между телами может происходить кондукцией – переходом тепла от более нагретых частиц к менее нагретым, конвекцией – переносом тепла в жидкости или газе, вызванным перемещением частиц под влиянием неравномерности температур в разных точках объема (естественная конвекция), или перемешиванием (искусственная конвекция) и радиацией (излучением), т. е. превращением тепловой энергии тела в лучистую и передачей ее в окружающее пространство.

Различают два вида теплообменных процессов: теплоотдачу и теплопередачу.

Теплоотдача – это процесс теплообмена между твердой стенкой и обтекающей ее жидкой или газообразной средой.

Теплопередача – это процесс теплообмена между двумя средами, жидкими или газообразными, разделенными твердой перегородкой.

В теплообменных устройствах используются одновременно различные виды теплообмена, подчиняющиеся различным законам. Рассмотрим их отдельно. Причем рассматриваться здесь и в дальнейшем будут процессы с установившимся тепловым режимом, при котором температура тел в каждой точке пространства неизменна во времени.

Теплопроводность (кондукция). Количество тепла Q , проходящее в единицу времени через плоскую стенку толщиной δ в результате теплопроводности, определяется уравнением закона Фурье

$$Q = \lambda_t F \frac{t_{ct}^I - t_{ct}^{II}}{\delta}, \quad (10.12)$$

где λ_t - коэффициент теплопроводности *вт/м·град*; F – площадь стенки, m^2 ; δ - толщина стенки, m ; t_{ct}^I, t_{ct}^{II} – температура поверхностей стенки, *град*.

Преобразуем выражение (10.12) следующим образом:

$$Q = \frac{t_{ct}^I - t_{ct}^{II}}{\frac{\delta}{\lambda_t F}} = \frac{t_{ct}^I - t_{ct}^{II}}{R}. \quad (10.13)$$

Эта формула аналогична закону Ома в электротехнике: разность температур (температурный напор) играет роль разности потенциалов э. д. с.; количество тепла Q , проходящего в единицу времени, соответствует силе тока; величину $R = \delta / \lambda_t F$ можно считать тепловым сопротивлением.

При последовательном прохождении тепла через ряд стенок или слоев их тепловые сопротивления, аналогично электрическим сопротивлениям при последовательном включении, складываются:

$$R = \sum R_i = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{ti} F_i}. \quad (10.14)$$

Формула для количества тепла, проходящего через ряд слоев:

$$Q = \frac{t_{ct}^I - t_{ct}^{II}}{\sum \frac{\delta_t}{\lambda_{ti} F_i}}, \quad (10.15)$$

где i – номер слоя.

Если поверхности всех слоев одинаковы (многослойная стенка), то

$$Q = F \frac{t_{ct}^I - t_{ct}^{II}}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_{ti}}}, \quad (10.16)$$

Тепловое сопротивление и количество тепла, проходящего через однородную цилиндрическую стенку (стенку трубы) длиной l (рис. 10.1), определяется по формуле

$$Q = 2\pi\lambda_t l \frac{t_{ct}^I - t_{ct}^{II}}{\ln \frac{d_1}{d_2}} . \quad (10.17)$$

Из полученного выражения следует, что при постоянном коэффициенте λ_t разность температур на границах концентрических слоев стенки пропорциональна логарифму отношения диаметров. Изменение температуры по толщине цилиндрической стенки выразится логарифмической кривой (см. рис. 10.1).

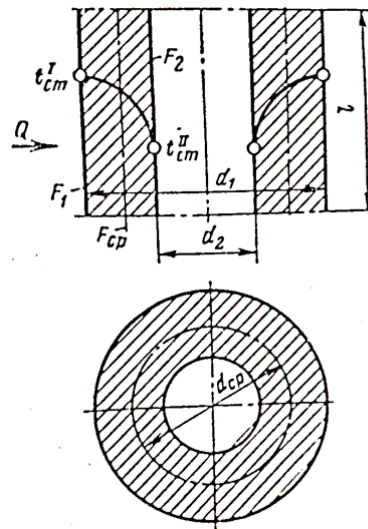


Рисунок 10.1 Распределение температур в цилиндрической стенке

Преобразуя (10.17), имеем

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln \frac{d_1}{d_2} . \quad (10.18)$$

Это выражение аналогично формуле для плоской стенки и может быть представлено как

$$R = \frac{\delta}{\lambda_t F_{cp}} , \quad (10.19)$$

где F_{cp} – поверхность цилиндра, имеющего средний логарифмический диаметр $F_{cp} = \pi d_{cp} l$.

$$d_{cp} = \frac{d_1 - d_2}{\ln \frac{d_1}{d_2}} . \quad (10.20)$$

Средний логарифмический диаметр всегда несколько меньше среднего арифметического $d_1 + d_2 / 2$, но для тонких труб разница незначительна; при $d_1/d_2 = 1,4$ составляет 1 %, при $d_1/d_2 = 2$ - около 4%, а при

$d_1/d_2=3$ - примерно 10%. Практически при расчетах достаточно брать средний арифметический диаметр, тогда формула (10.17) для теплового потока через цилиндрическую стенку примет вид

$$Q = \pi \lambda l \frac{d_1 + d_2}{d_1 - d_2} (t_{ct}^I - t_{ct}^{II}) , \quad (10.21)$$

так как

$$\ln \frac{d_1}{d_2} = 2 \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} . \quad (10.22)$$

Наиболее часто при расчете теплообменных устройств встречается случай передачи тепла от одной жидкости к другой через стенку. На рис. 10.2 показано распределение температуры при теплопередаче через плоскую многослойную стенку, а на рис. 10.3 – через цилиндрическую многослойную.

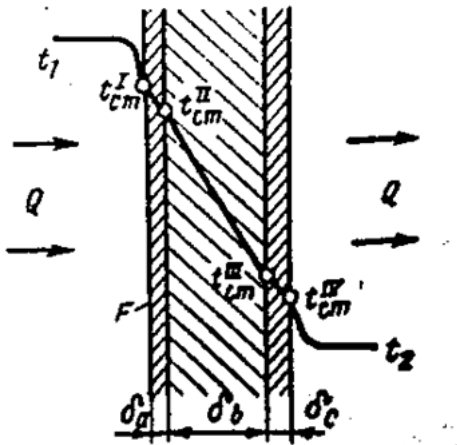


Рисунок 10.2 Теплопередача через плоскую многослойную стенку

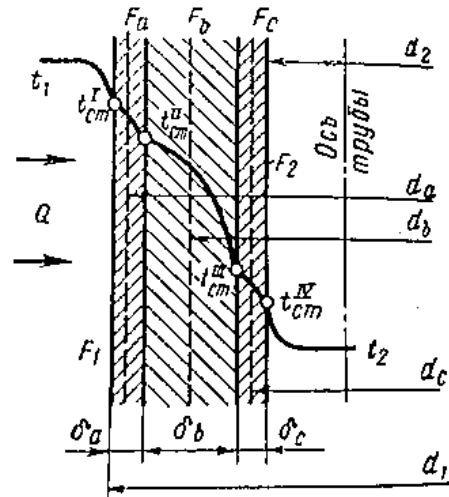


Рисунок 10.3 Теплопередача через цилиндрическую многослойную стенку

Количество тепла Q , передаваемое от жидкости к стенке, определяется выражением

$$Q = \alpha F (t_{ж} - t_{ct}) , \quad (10.23)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $вт/м^2 \cdot град$; F – площадь теплоотдачи, $м^2$; $t_{ж}$, t_{ct} – температура соответственно жидкости и стенки, $град$.

Коэффициент теплоотдачи α не определяется только свойствами материала стенки, а зависит от рода жидкости, ее состояния, скорости движения, величины и формы поверхности стенки.

Перепишем формулу (10.23) в виде

$$Q = \frac{t_{ж} - t_{ct}}{\frac{1}{\alpha F}} = \frac{t_{ж} - t_{ct}}{R_{\alpha}} , \quad (10.24)$$

где $R_a=1/\alpha F$ тепловое сопротивление при переходе тепла от жидкости к стенке.

Пользуясь уравнениями (10.13) и (10.24), напомним ряд выражений, соответствующих условиям рис. 10.2:

$$\begin{cases} t_1 - t_{ct}^I = QR_{\alpha_1} = \frac{Q}{\alpha_1 F_1} ; \\ t_{ct}^I - t_{ct}^{II} = QR_a = Q \frac{\delta_a}{\lambda_a F_a} ; \\ t_{ct}^{II} - t_{ct}^{III} = QR_b = Q \frac{\delta_b}{\lambda_b F_b} ; \\ t_{ct}^{III} - t_{ct}^{IV} = QR_c = Q \frac{\delta_c}{\lambda_c F_c} ; \\ t_{ct}^{IV} - t_2 = QR_{\alpha_2} = Q \frac{1}{\alpha_2 F_2} ; \end{cases} \quad (10.25)$$

где F_a, F_b, F_c – средние величины поверхности слоев цилиндрической стенки.

Суммируем эти равенства и исключая промежуточные температуры получим

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= Q(R_{\alpha_1} + R_a + R_b + R_c + R_{\alpha_2}) = QR = \\ &= Q \left(\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta_a}{\lambda_a F_a} + \frac{\delta_b}{\lambda_b F_b} + \frac{\delta_c}{\lambda_c F_c} + \frac{1}{\alpha_2 F_2} \right), \end{aligned} \quad (10.26)$$

В случае плоской стенки величины поверхностей всех слоев одинаковы и выражение можно преобразовать так:

$$Q = F \frac{t_1 - t_2}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} = kF\Delta t, \quad (10.27)$$

где $\frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}$ - коэффициент теплопередачи (в данном случае для трехслойной стенки), *вт/м²·град*.

Отдельные слагаемые в выражении коэффициента теплопередачи представляют собой тепловые сопротивления для 1 м^2 поверхности и называются термическими сопротивлениями.

При теплопередаче через тонкую чистую металлическую стенку термическое сопротивление стенки мало по сравнению с сопротивлениями теплопередачи $1/\alpha_1$ и $1/\alpha_2$. В этом случае коэффициент теплопередачи k можно вычислять по формуле

$$k = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (10.28)$$

По аналогии с плоской многослойной стенкой определяется и теплопередача для многослойной цилиндрической стенки (см. рис. 10.3):

$$Q = k_1 F_1 \Delta t ; Q = k_2 F_2 \Delta t . \quad (10.29)$$

$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_a d_1}{\lambda_a d_a} + \frac{\delta_b d_1}{\lambda_b d_b} + \frac{\delta_c d_1}{\lambda_c d_c} + \frac{d_1}{\alpha_2 d_2}}$ - коэффициент теплопередачи, отнесенный к поверхности F_1 (в данном случае – наружной);

$k_2 = \frac{1}{\frac{d_2}{\alpha_1 d_1} + \frac{\delta_a d_2}{\lambda_a d_a} + \frac{\delta_b d_2}{\lambda_b d_b} + \frac{\delta_c d_2}{\lambda_c d_c} + \frac{1}{\alpha_2}}$ - коэффициент теплопередачи, отнесенный к поверхности F_2 (внутренней).

Обычно принято при написании формул для определения k располагать термические сопротивления по движению потока тепла, индексом 1 отмечать более нагретую жидкость, а индексом 2 – менее нагретую. Коэффициент теплопередачи удобнее относить к той стороне поверхности, на которой коэффициент теплоотдачи α меньше, например, к наружной поверхности труб теплообменника, в котором протекает горячая жидкость.

В этом случае можно для тонкостенных труб пренебречь разницей между площадью внутренней и наружной поверхностью труб и коэффициенты k_1 и k_2 для цилиндрической многослойной стенки подсчитать по более простой формуле для плоской стенки.

Температурный напор. В реальных теплообменных устройствах температура жидкостей или газов по обе стороны разделяющей их стенки изменяется при движении жидкости вдоль стенки и тепловом обмене. Для расчетов вводится понятие среднего температурного напора, который зависит от начальных и конечных температур обеих жидкостей – охлаждающей и охлаждаемой. Средний температурный напор вычисляется по формуле

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} , \quad (10.30)$$

где Δt_2 - разность температур жидкостей на одном конце теплообменного аппарата, трубы или стенки, град; Δt_1 - разность температур жидкостей на другом конце аппарата, трубки или стенки, град.

10.1.3. Теория подобия. Безразмерные величины [17,284]

Для определения количества тепла, переходящего от жидкости к стенке или наоборот, необходимо составить дифференциальные уравнения теплообмена и дифференциальные уравнения движения жидкости. Решить эти уравнения аналитически очень трудно, поэтому на практике обычно для решения этой задачи пользуются уравнением теплового баланса:

$$Q = \alpha F \Delta t . \quad (10.31)$$

Трудность расчета заключается в нахождении коэффициента теплоотдачи α , зависящего от формы, размеров, температуры стенки, состояния поверхности стенки, характера и скорости движения жидкости, а также физических свойств и температуры жидкости.

Определить опытным путем α из-за множества влияющих факторов также сложно. Изучение явлений гидродинамики и теплообмена проводится в сложных и часто громоздких агрегатах, что связано с большими затратами и трудностями.

Но и изучив какое-либо явление и получив интересующие данные по конкретному единичному явлению теплообмена или гидродинамики, нельзя быть уверенным, что найденные закономерности справедливы для проектируемого аппарата, пока недоступного для изучения.

Теория подобия позволяет распространить результаты, полученные на упрощенных и более удобных для экспериментирования моделях, на группу подобных явлений.

Наиболее важный вывод теории подобия заключается в том, что нет необходимости искать зависимость коэффициента теплоотдачи от каждого влияющего фактора в отдельности. Существует однозначная зависимость между определёнными безразмерными комплексами величин, характерными для данных процессов и условий движения. Эти комплексы называются критериями подобия.

Безразмерные критерии подобия исключают масштабный фактор и позволяют получать экспериментальные и теоретические решения для частного случая и распространить на все однотипные задачи.

Рассмотрим две группы критериев подобия:

- 1) критерии гидродинамического подобия, определяющие характер течения жидкости;
- 2) критерии теплового подобия, характеризующие тепловые процессы.

Кинематический критерий – число Рейнольдса.

$$Re = \frac{v \gamma d}{\mu g} = \frac{v d}{\nu} , \quad (10.32)$$

где v – средняя скорость жидкости, $м/сек$; d – диаметр трубы или линейный размер, $м$; γ – удельный вес жидкости, $н/м^3$; μ – коэффициент динамической вязкости, $н \cdot сек/м^2$; g – ускорение силы тяжести, равное $9,81 м/сек^2$.

В зависимости от значения Re различают движение жидкости ламинарное и турбулентное. Жидкость движется ламинарно при $Re \leq 2300$ и турбулентно при $Re > 10000$. В области $2300 < Re < 10000$ движение жидкости носит переходной характер – от ламинарного к турбулентному.

Критерий гидравлического сопротивления – критерий Эйлера:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2} = \frac{\xi}{2}, \quad (10.33)$$

где Δp - сопротивление движению жидкости, $н/м^2$; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; ρ - плотность жидкости, $кг/м^3$; v^2 - средняя скорость жидкости, $м/сек$.

В частности, для прямой круглой трубы

$$Eu = \frac{1}{2} \xi \frac{l}{d}, \quad (10.34)$$

где l, d – соответственно длина и диаметр трубы; ξ - коэффициент трения.

Критерий Эйлера можно выразить через критерий Рейнольдса:

$$Eu = f(Re), \text{ т. е. } \frac{\Delta p}{\rho v^2} = f\left(\frac{vd}{\nu}\right). \quad (10.35)$$

Вид функции f , согласно теории подобия, должен быть одним и тем же для всех геометрически подобных каналов при одинаковых условиях входа жидкости в канал. Зная из опыта аналитическое или графическое выражение этой функции, мы получаем возможность определять искомую величину Δp для любых других комбинаций величин v, ν, ρ, d , входящих в формулу (10.40).

Критерий теплоотдачи – критерий Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (10.36)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $вт/м^2 \cdot град$; d – диаметр трубы, $м$; λ - коэффициент теплопроводности жидкости, $вт/м \cdot град$.

Критерий физических свойств (подобия температурных и скоростных полей) – критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a}, \quad (10.37)$$

где $a = \lambda / c_p \rho$ - коэффициент температуропроводности – физический параметр жидкости (газа), $м^2/сек$.

Критерий Нуссельта является функцией критериев Рейнольдса и Прандтля:

$$Nu = f(Re, Pr) \text{ или } \frac{\alpha d}{\lambda} = f_1\left(\frac{vd}{\nu}, \frac{\nu}{a}\right). \quad (10.38)$$

Вид функций f_1 находится из опыта, но полное исследование вопроса облегчается нахождением зависимости Nu от двух переменных Re и Pr , а не зависимости α от всех величин, входящих в выражения (10.32) и (10.38).

Функция $f_1(Re, Pr)$ имеет один и тот же вид не только для данного канала или определенной системы твердых стенок в потоке, но и для всех

геометрически подобных систем независимо от рода жидкости, если условия входа жидкости в канал подобны.

Критерий конвективного теплообмена – критерий Пекле:

$$Pe = RePr = \frac{vd}{\nu} \cdot \frac{\nu}{a} = \frac{vd}{a}, \quad (10.39)$$

Критерии подобия Re и Pr (или Pe) играют роль аргументов в зависимостях $Eu=f(Re)$; $Nu=f(Re, Pr)$ и $Nu=\psi(Re, Pr, l/d)$ и называются определяющими критериями.

Критерий подъемной силы – критерий Грасгофа является определяющим при свободном движении (естественной конвекции):

$$Gr = \frac{d^3 g \beta \Delta t}{\nu^2}, \quad (10.40)$$

где Δt - температурный напор (разность температур стенки и жидкости); β – коэффициент объемного расширения; d – линейный размер, координата.

В этой формуле значения параметров определяются при температуре $t=0,5(t_{жс}+t_{см})$, где $t_{жс}$ – температура жидкости в месте, удаленном от стенки, а $t_{см}$ – средняя температура стенки в градусах Цельсия.

При расчете вертикальных или горизонтальных стенок в качестве d берется высота H для вертикальных стенок или длина l по направлению потока омывающей жидкости для горизонтальных стенок.

При расчете одиночного трубопровода с естественной конвекцией внешней среды берется наружный диаметр трубы, а при расчете внутренней полости трубы – внутренний диаметр.

Опытные данные по теплоотдаче при естественной конвекции выражаются зависимостью между критериями Nu , Gr и Pr .

Критерий краевого подобия – критерий Био:

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda_{ст}}, \quad (10.41)$$

где α – коэффициент теплоотдачи со стороны поверхности стенки (ребра), $вт/м^2 \cdot град$; $\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности материала стенки (ребра), $дж/кг \cdot град$; δ – толщина стенки, ребра, $м$.

Критерий Bi характеризует связь между полем температур в твердом теле и условиями теплоотдачи всей поверхности, т.е. интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Согласно теории подобия два явления движения жидкости подобны, если они происходят в геометрически подобных системах – каналах одинаковой формы с размерами, уменьшенными или увеличенными в одном и том же соотношении, а скорости жидкости во всех соответствующих точках и перепады давлений между любыми двумя соответственными точками пропорциональны.

Изогнутые каналы геометрически подобны тогда, когда отношения R/d в обоих случаях одинаковы (R –радиус изгиба канала, d –ширина или диаметр канала). Цилиндрические трубы геометрически подобны, когда отношение длины l к диаметру d у них одинаково.

Чтобы пользоваться экспериментальными данными, необходимо убедиться в том, что:

- модель, на которой проведены эксперименты, геометрически подобна рассчитываемому образцу;
- при входе в модель обеспечено подобное образцу распределение скоростей;
- кинематический критерий Re одинаков у модели и у образца.

При соблюдении этих условий окажется, что движение жидкости в модели подобно движению ее в образце, а перепады давления между соответствующими точками пропорциональны, то есть критерий Eu образца и модели одинаков. Потерю давления в образце можно вычислить по формуле (10.33), решив ее относительно Δp :

$$\Delta p = Eu\rho v^2 . \quad (10.42)$$

Наряду с гидродинамическим существует и тепловое подобие. При движении жидкости температура ее изменяется под влиянием конвективного теплообмена и теплопроводности жидкости.

Если критерий конвективного теплообмена Pe одинаков у модели и у рассчитываемого образца, между ними имеется тепловое подобие. Таким образом, если критерии Re и Pe у модели и образца одни и те же, то не только скорости, но и температуры в двух соответственных точках модели и образца при вынужденном движении находятся в одинаковом отношении.

Поскольку критерии Re и Pe одинаковы, то одинаково и их отношение $Re/Pe=Pr$ у модели и у образца.

При свободном движении жидкости для гидродинамического подобия необходимо, чтобы были одинаковы критерии Gr и Pr .

Тепловое подобие явлений при вынужденном и свободном движении характеризуется одинаковым критерием Nu .

Зная полученный опытным путем коэффициент теплоотдачи α' , можно вычислить и коэффициент теплоотдачи образца:

$$Nu = \frac{\alpha' d'}{\lambda'} = \frac{\alpha d}{\lambda} , \quad (10.43)$$

откуда

$$\alpha = \alpha' \frac{\lambda d'}{\lambda' d} = Nu \frac{\lambda}{d} , \quad (10.44)$$

где α' , d' , λ' - соответственно коэффициент теплоотдачи, диаметр трубы и коэффициент теплопроводности жидкости для модели; α , d , λ - то же, для рассчитываемого образца.

Независимо от изменения отдельных величин, входящих в критерии Re и Pr (для вынужденного движения), при неизменности критериев Re и Pr явления будут подобными.

10.1.4. Конвективный теплообмен [17,285,286]

Конвекция – это перенос тепла в жидкости или газе, вызванный перемещением частиц под влиянием неравномерности температур в разных точках объема (естественная конвекция) или в результате принудительного перемешивания (искусственная конвекция).

Передача тепла соприкосновением от стенки к жидкости и дальнейшее его распространение в жидкости путем конвекции (или от жидкости к стенке) получила название *конвективного теплообмена*.

При расчете теплообмена наиболее сложно определить коэффициент теплоотдачи α . Коэффициент теплоотдачи находится по критерию теплоотдачи Nu , который является, в свою очередь, функцией безразмерных критериев подобия Re , Pr , Pe . Вид функции определяется опытным путем для различных условий. К этим условиям можно отнести течение внутри прямой круглой трубы, течение в каналах некруглого сечения, течение в изогнутых трубах и течение при поперечном обтекании пакетов труб с различным расположением их в пакете.

Теплообмен при течении жидкости внутри прямой круглой трубы. Зная значение критерия Nu , можно определить величину коэффициента теплоотдачи α , отнесенному к среднелогарифмическому температурному напору между жидкостью и стенкой:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d} . \quad (10.45)$$

С точностью, достаточной для практических расчетов, при ламинарном течении жидкости ($Re < 2300$) с неизменными физическими свойствами для круглой трубы можно пользоваться формулами:

$$Nu = 1,61 \left(Pe \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \varepsilon_t \text{ при } Pe \frac{d}{l} > 12 , \quad (10.46)$$

$$Nu = 3,66 \text{ при } Pe \frac{d}{l} < 12 . \quad (10.47)$$

Эти формулы справедливы для принудительной конвекции. При значениях $Pr \times Gr < 5 \cdot 10^5$ влияние свободной конвекции можно не учитывать. Влияние изменения вязкости с температурой учитывается множителем

$$\varepsilon_t = \left(\frac{v_0}{v_{ст}} \right)^{0,14} , \quad (10.48)$$

где $\nu_0, \nu_{ст}$ - значения вязкости при температуре потока и средней температуре стенки.

Средняя температура стенки

$$t_{ст} = 0,5(t_1 + t_2) , \quad (10.49)$$

где t_1 и t_2 – температуры сред по обе стороны стенки.

Формула (10.46) справедлива при $60 < Pe \cdot d/l < 62 \cdot 10^4$ и $Pr \cdot Gr < 5 \cdot 10^5$ (для круглых труб) и при $10 < Re < 2300$ и $0,08 < \nu_{см}/\nu_0 < 1500$.

При значениях $Pr \cdot Gr > 5 \cdot 10^5$ наступает вязкостно-гравитационный режим. Необходимо также учитывать естественную конвекцию. Критерий определяется в этом случае по формуле И. Т. Аладьева, учитывающей естественную конвекцию:

$$Nu = 0,74Re^{0,2} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot Pr^{0,2} . \quad (10.50)$$

При турбулентном потоке критерий Nu определяется по формуле

$$Nu = 0,023Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8}(\varepsilon_t)^n \quad (10.51)$$

при $0,6 < Pr < 100$ и $7 \cdot 10^3 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$.

Теплоотдача при турбулентном течении в круглой трубе практически стабилизируется при $l/d \geq 50$. При значениях $l/d < 50$ значения коэффициента α , полученные по критерию Nu , нужно умножить на поправочный коэффициент ε_L :

$$\alpha' = \alpha \cdot \varepsilon_L . \quad (10.52)$$

В формуле (10.57) ε_t - поправочный коэффициент на неизотермичность течения с учетом температурного фактора:

$$\varepsilon_e = \frac{Pr}{Pr_{ст}} , \quad (10.53)$$

где $Pr_{ст}$ – критерий Pr при средней температуре жидкости и стенки.

Показатель степени n в формуле (10.57); при нагревании ($t_{ст} > t_{жс}$) равен 0,06, при охлаждении ($t_{ст} < t_{жс}$) равен 0,25.

Физические характеристики в критериях Pr , Pe и Nu относятся к средней температуре жидкости.

При $Pr > 100$ следует пользоваться формулами Крауссольда, учитывающими направление теплового потока:

для нагревания

$$Nu = 0,024Re^{0,8}Pr^{0,37} , \quad (10.54)$$

для охлаждения

$$Nu = 0,024Re^{0,8}Pr^{0,3} . \quad (10.55)$$

Область применения формул: $0,7 < Pr < 2500$; $Re > 10^4$.

В переходной области чисел Re (2300 – 7000 для круглых труб) некоторые специалисты рекомендуют вести расчет по формулам:

$$Nu \approx 21 \cdot \left(Pr \frac{d}{l} \right)^{0,33} \left(\frac{Re}{2300} \right)^{lg \frac{l}{d}} \quad \text{при } Re Pr \frac{d}{l} > 12, \quad (10.56)$$

$$Nu \approx 3,66 \cdot \left(\frac{Re}{2300} \right)^{2,3+lg Pr} \quad \text{при } Re Pr \frac{d}{l} < 12. \quad (10.57)$$

Эти формулы справедливы для условий: $Pr \geq 0,5$; $2300 \leq Re \leq 5000$; $l/d > 30$.

В переходных режимах можно также пользоваться формулой:

$$Nu = 0,023 \psi Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (10.58)$$

где ψ - поправочный множитель, значения которого в зависимости от величины Re следует брать из графика на рисунке 10.4.

Область применения этой формулы: $0,7 < Pr < 100$; $l/d > 50$.

Для вязких жидкостей при значениях Re от 2300 до 10 000 и для газовых потоков с Re , близким к $Re_{кр}$, лучше пользоваться экспериментальными данными зависимости Nu от Re и Pr в переходной области. На графике рис. 10.5 приведена зависимость Nu/Pr^n от критерия Re для различных величин: $n=0,37$ для охлаждения и $n=0,4$ для нагревания.

Значение физических констант, входящих в критерии Nu , Re и Pr берут при средней температуре потока. Принимая за 100% значения Nu , полученные по графику (см. рис. 10.5), сравниваем их с результатами подсчетов по формуле (10.57). Результаты, полученные по формуле (10.57), дают превышение на 150%.

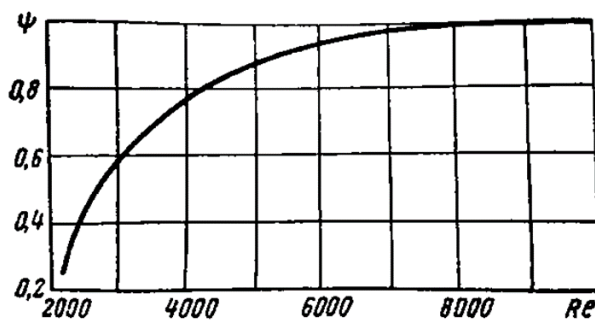


Рисунок 10.4 Поправочный множитель

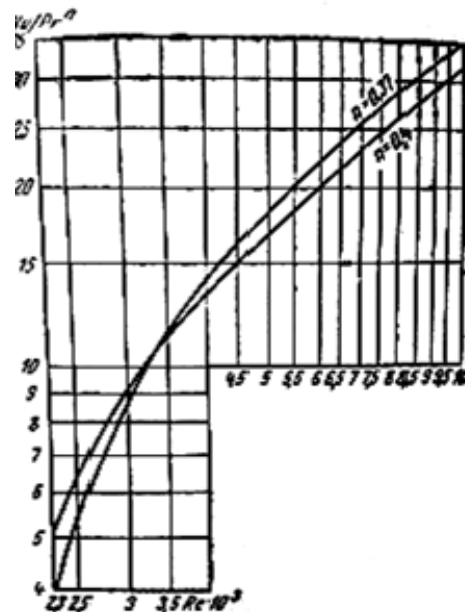


Рисунок 10.5 Критерий Nu для области переходных режимов

Так как график дает наиболее низкие результаты критерия Nu и коэффициента теплоотдачи α вычисленного по критерию Nu , целесообразно пользоваться именно графиком. Допускаемое занижение коэффициента α увеличит надежность результатов расчета и гарантирует нормальный тепловой режим оборудования.

10.1.5. Основные уравнения теплопередачи [286]

Гидроагрегаты гидропривода горных машин обычно располагаются на баке или в непосредственной близости от него. Иногда насосы размещают в масляной ванне. Возможно также размещение гидроагрегатов на расстоянии до 100 м и более.

Основные уравнения теплопередачи для каждого из названных случаев имеют свои особенности.

Случай 1. Гидроагрегаты расположены непосредственно на баке. Теплопередача от рабочей жидкости будет производиться несколькими путями: от корпусов насоса, гидрометра и аппаратуры, от стенок бака и теплообменным устройством при его наличии. Общее количество отведенного тепла определится как сумма тепла, отведенного в отдельных теплообменных процессах.

При отводе тепла от поверхностей гидроагрегатов, аппаратуры, металлических трубопроводов и маслобаков каждая из составляющих рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{п}} = k_{\text{п}} F_{\text{п}} \Delta t , \quad (10.59)$$

где $F_{\text{п}}$ - теплоотводящая поверхность, м^2 ; Δt - перепад температур рабочей жидкости и внешней среды, $^{\circ}\text{C}$ (средний температурный напор); $k_{\text{п}}$ - коэффициент теплопередачи, $\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$.

Коэффициент теплопередачи определяется по формулам, приведенным ранее и выбранным в соответствии с режимом жидкости и условиями. При теплопередаче через тонкую чистую металлическую стенку коэффициент теплопередачи можно вычислять, пренебрегая ее термическим сопротивлением, по формуле

$$k = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} , \quad (10.60)$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи от рабочей жидкости к стенке; α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, являющемуся в данном случае внешней средой.

Во всех случаях расчета, как по этой формуле, так и по другим формулам, входящие в них α_2 слагаются из конвективной α_{2k} и радиационной α_{2r} составляющих

$$\alpha_2 = \alpha_{2k} + \alpha_{2r} . \quad (10.61)$$

Величины $\alpha_1, \alpha_{2k}, \alpha_{2n}$ определяются по формулам, приведенным ранее.

Количество тепла, отведенное теплообменником, определяется по формуле, аналогичной формуле

$$Q_T = k_T F_T \Delta t, \quad (10.62)$$

где F_T – площадь теплообменника; Δt – средний температурный напор; k_T – коэффициент теплопередачи.

Общее количество отведенного тепла

$$Q = Q_T + \sum_{i=1}^n Q_{ni}, \quad (10.63)$$

где Q_T – тепло, отведенное теплообменником; Q_{ni} – тепло, отведенное внешней поверхностью одного из элементов гидросистемы; i – номер элемента гидросистемы; n – количество элементов гидросистемы, участвующих в расчете.

Случай 2. Гидроагрегаты расположены в масляной ванне. Теплопередача от рабочей жидкости будет также происходить двумя путями: от стенок маслобака и теплообменным устройством. Общее количество отведённого тепла определится формулой

$$Q = Q_T + Q_{\Pi}, \quad (10.64)$$

где Q_T – тепло, отведенное теплообменником; Q_{Π} – тепло, отведенное внешней поверхностью маслобака.

Необходимо учесть, что при подсчете Q_{Π} не все поверхности маслобака могут одинаково отводить тепло. В остальном величины Q_T и Q_{Π} определяются так же, как и в случае 1.

Случай 3. Гидроагрегаты расположены на значительных расстояниях. Расчеты проводятся в этом случае по тем же формулам, что и в случае 1. Особенность заключается в более тщательном определении температурного напора, так как необходимо учитывать падение температуры при течении жидкости в прямом и обратном трубопроводах, учитывать теплоотвод трубопроводов и гидроаппаратов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

10.2. Влияние ГДАД на теплообмен в потоках жидкостей

10.2.1. Коэффициент теплопередачи

В работах Седова Л.И., Повха И.Л., Пилипко В.Н. и др. приведены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента теплоотдачи при течении растворов ПАА в круглой трубе, а также данные по профилям температуры в канале прямоугольного сечения для потоков с добавками ПАА и МПАВ – промышленной пасты «метаупон» [5,57,66,197,287-296].

Опыты по определению коэффициента теплоотдачи проводились на теплообменнике типа «труба в трубе» при различных концентрациях ПАА и двух числах Рейнольдса $Re=1,43 \cdot 10^4$ и $1,77 \cdot 10^4$. Установлено, что с ростом концентрации ПАА в интервале $C=(0 \div 3) \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ происходит снижение коэффициента теплоотдачи. При этом большому значению числа Re соответствует более значительное уменьшение турбулентного теплообмена [288].

10.2.2. Профили температур

Эксперименты по измерению профилей температуры проводились в канале прямоугольного сечения $50 \times 20 \text{ мм}$. На расстоянии 2 м от входа (≈ 70 калибров) размещался рабочий участок длиной $1,2 \text{ м}$, боковые стенки которого были изготовлены из органического стекла, а верхняя и нижняя – из нержавеющей стали. Через верхнюю и нижнюю стенки пропусклся переменный ток силой от 40 до 140 ампер, что обеспечивало подвод тепла к жидкости. В конце рабочего участка проводили измерения профилей температуры [57,288,296].

Температура жидкости измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром термоэлектродов $0,09 \text{ мм}$, которая перемещалась по сечению потока. Средние значения термоэлектродвижущей силы определяли потенциометром УПИП – $60M$. Для измерения температуры стенки в верхнюю и нижнюю части рабочего участка были впаяны по три термопары.

На рис. 10.6 и 10.7, в безразмерных координатах, приведены профили температуры в растворах ПАА и «метаупона», содержащего дополнительно в качестве способствующего мицеллообразованию вещества 2 \%вес . хлористого магния. По оси ординат отложена безразмерная температура $\Theta^+ = (T_w - T) \rho C_p U^* / q_w$, где t_w - температура стенки, t - температура жидкости в потоке, ρ , C_p – плотность и удельная теплоемкость исследуемой жидкости, U^* - динамическая скорость рассчитанная по напряжению трения на стенке и плотности жидкости, q_w - тепловой поток через стенку канала. По оси абсцисс отложена безразмерная координата $y^+ = U^* y / \nu$ которая рассчитывалась по вязкости растворов гидродинамически-активных веществ.

Из рис. 10.6 и 10.7 видно, что профили температур в потоках с гидродинамически-активными добавками располагаются выше по сравнению с профилем для воды. При этом прямолинейный участок в профиле температур для растворов ПАА и «метаупона» смещен в сторону больших значений координаты y^+ . Полученные опытные данные свидетельствуют о том, что в течениях с гидродинамически-активными добавками происходит перераспределение термического сопротивления между отдельными областями турбулентного потока. В частности, это

перераспределение сопровождается возрастанием термического сопротивления пристенной области, включающей вязкий подслой и переходную зону. Отметим, что полученные данные согласуются с результатами измерений профилей температуры в растворах ПАА, которые приведены в работах Хабахпашевой Е.М.

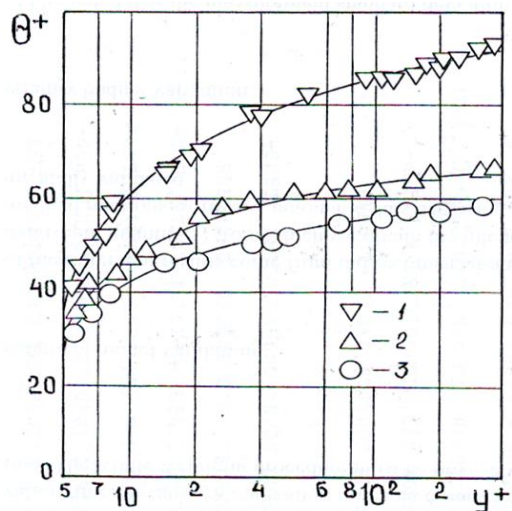


Рисунок 10.6 Профили температуры в водных растворах полиакриламида (1,2) и в воде (3).

1,2 – концентрация ПАА $C_{ПАА} = 0,01$ и $0,005\%$ вес., соответственно.

Данные работы [296]

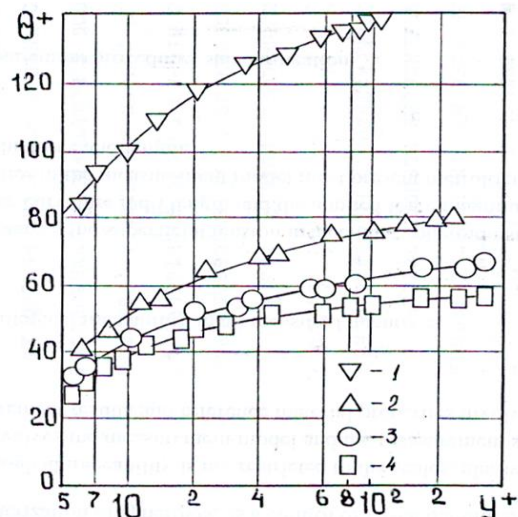


Рисунок 10.7 Профили температуры в водных растворах метаупона (1,2,3) и в воде (4). 1,2,3 – концентрация

метаупона $C_{МУ} = 0,4; 0,2; 0,3\%$ вес., соответственно.

Данные работы [296]

Воздействие добавок ПАВ и полимеров на пристенную турбулентность приводит не только к снижению гидродинамического сопротивления трения, но и к значительному уменьшению турбулентного теплообмена.

При числах Прандля $Pr > 1$ ГДАД оказывают большое влияние на снижение уровня тепло- и массопереноса, чем на уменьшение турбулентного трения. При этом отмечается, что для случаев, когда $Pr \ll 1$ добавки незначительно снижают уровень теплопереноса.

Влияние шероховатости поверхности на сопротивление трения и теплообмен проявляется по разному в зависимости от режима течения и величины числа Прандля [289,291,297]. Максимальная интенсификация процесса теплопереноса при $Pr > 1$ наблюдается в переходном режиме проявления шероховатости. При этом следует отметить, что существует область значений чисел Рейнольдса, в которой влияние шероховатости на теплообмен превосходит ее влияние на турбулентное сопротивление. При числах $Pr < 1$ шероховатость незначительно повышает скорость теплообмена. При этом величина отношения коэффициентов теплообмена на шероховатой и гладкой поверхностях монотонно увеличивается с ростом числа Рейнольдса.

10.2.3. Уменьшение магистральных и диссипативных потерь холода [7]

При эксплуатации шахтных холодильных установок возникает вопрос о расчёте теплообмена «трубопровод-окружающая среда» и учёте диссипативных холодопотерь на режим работы установки в целом.

В подземных стационарных установках кондиционирования воздуха воздухоохладительные аппараты часто располагаются на значительных (10-15 км и более) расстояниях от холодильных машин или теплообменников. Возникающий при этом теплообмен между воздухом и трубопроводом может существенно влиять на общую производительность такой установки.

Уравнение теплового баланса для горной выработки, по которой проложены трубопроводы основного хладоносителя, можно записать как

$$G(i_2 - i_1) = K_\tau ULt t_n \pm \frac{\sigma L}{2} \sin \psi - (t_2 - t_1) + \Sigma Q_T - Q_x, \quad (10.65)$$

где G – расход воздуха, кг/час; i – теплосодержание воздуха, ккал/кг; K_τ – коэффициент нестационарного теплообмена, ккал/м²·час·град.; U – периметр сечения выработки, м.; L – длина выработки, м; t – температура воздуха, °С; t_n – температура пород в начале выработки; σ – геометрический градиент, град/м; ψ – угол наклона выработки, град.; ΣQ_T – суммарное тепловыделение от всех учитываемых источников тепла, за исключением теплообмена с породным массивом, ккал/час; Q_x – общие потери холода через стенки циркулярного трубопровода хладоносителя, ккал/час.

Используя функциональную зависимость $i = i(t, m, n, \varphi, l, b)$, где t – температура воздуха, °С; b – коэффициент, учитывающий влияние барометрического давления на влагосодержание воздуха; φ – относительная влажность воздуха; m, n, l – численные коэффициенты, принимающие в интервале температур $2 \div 30$ °С значения $m = 3.872$, $n = 0.169$, $l = 0.0186$, преобразуем исходное уравнение баланса

$$0,25G(t_2 - t_1) - 0.595Gb_2\varphi_2(m + nt_1 + lt_2^2) - b_1\varphi_1(m + nt_1 + lt_1^2) = K_\tau UL \left(t_n \pm \frac{\sigma L}{2} \sin \psi - \frac{t_1+t_2}{2} \right) + \Sigma Q_T - Q_x. \quad (10.66)$$

Значения величин, входящих в это уравнение, кроме потерь холода Q_x , являются исходными данными и определяются по соответствующей методике тепловых расчётов.

Практика и расчёт показывают, что в интенсивно проветриваемых выработках при отсутствии или неудовлетворительной теплоизоляции, потери холода через стенки трубопроводов хладоносителя составляют значительные величины.

Если принять изменение температуры воздуха и хладоносителя по длине выработки линейным, что вполне допустимо с практической точки зрения, то количество холода, теряемого через стенку трубопровода, можно определить по формуле:

$$q_x = kF(t_{cp} - t_{wcp}) , \quad (10.67)$$

где k – коэффициент теплопередачи, ккал/м²·час·град.; F – величина теплопередающей поверхности, м².

Среднеарифметический температурный напор между воздухом и хладоносителем на расчётном участке равен:

$$t_{cp} - t_{wcp} = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{t_{w1} - t_{w2}}{2} .$$

Здесь индексы «1» и «2» означают начало и конец рассматриваемого участка. С другой стороны, величина потерь холода на этом участке будет

$$q_x = G_w C_w (t_{w2} - t_{w1}) , \quad (10.68)$$

где t_w – температура расхода хладоносителя, °С; G_w – расход хладоносителя.

Так как в выработках обычно проложены прямая и обратная ветви циркулярного трубопровода хладоносителя, нужно учитывать потери холода в обеих ветвях. Решив совместно уравнения (10.67) и (10.68), получим

$$q_x = \frac{(t_1 + t_2)/2 - t'_{w1}}{\frac{1}{Fk} - \frac{1}{2} G_w} . \quad (10.69)$$

Это выражение описывает потери холода в прямой ветви циркулярного трубопровода. Аналогичное выражение записывается и для потери холода на таком же участке в обратной ветви трубопровода:

$$q'_x = \frac{(t_1 + t_2)/2 - t'_{w1}}{\frac{1}{Fk'} - \frac{1}{2} G_w} . \quad (10.70)$$

Штрихом обозначены величины для обратной ветви хладоносителя, соответствующие аналогичным величинам в формуле (10.69).

Общие холодопотери на рассматриваемом участке получим суммируя величины q_x и q'_x :

$$Q_x = \frac{t_1 + t_2 - 2t'_{w1}}{\frac{1}{Fk} - \frac{Fk}{4} G_w^2} - \frac{\Delta t_w}{\frac{1}{Fk} - \frac{1}{2} G_w} . \quad (10.71)$$

В связи с тем, что диаметры используемых труб иногда превышают 300мм, коэффициент теплопередачи можно определить для плоской стенки:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_\xi} \right)} . \quad (10.72)$$

Здесь α_w – коэффициент теплопередачи от хладоносителя трубопровода, ккал/м²·час·град.; δ_1 и δ_2 – толщины стенок трубопровода и

изоляции, м; λ_1 и λ_2 – коэффициент теплопроводности ступени трубопровода и материала изоляции, ккал/м·час·град.; α – коэффициент теплоотдачи от воздуха к трубопроводу, ккал/м²·час·град.; ξ – коэффициент влаговыделения.

Коэффициент теплоотдачи со стороны хладоносителя определяется по формуле:

$$\alpha_w = A_x \frac{W_{cp}^{0.8}}{d_{вн}^{0.2}}, \quad (10.73)$$

где W_{cp} – скорость хладоносителя в трубопроводе, м/с; $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода, м; A_x – коэффициент, учитывающий теплофизические параметры хладоносителя.

Коэффициент теплоотдачи от воздуха к трубопроводу определяется по формуле:

$$\alpha = 2.9 \frac{V^{0.8}}{d_{н}^{0.2}}. \quad (10.74)$$

Здесь V – скорость омывания трубопровода воздухом, м/с; $d_{н}$ – наружный диаметр трубопровода, м.

Коэффициент влаговыделения определяется из выражения $\xi = \frac{\Delta i}{C \Delta t}$

Используя приведённое выше выражение, можно получить расчётные формулы для определения температур хладоносителя по участкам.

Для прямой ветви трубопровода температура хладоносителя в конце участка

$$t_{w2} = t_{w1} + \frac{\frac{(t_1 + t_2)}{2} - t_{w1}}{\frac{G_w}{Fk} - 0.5}. \quad (10.75)$$

Для обратной ветви трубопровода

$$t'_{w2} = t'_{w1} + \frac{\frac{(t_1 + t_2)}{2} - t'_{w1}}{\frac{G_w}{Fk} - 0.5}. \quad (10.76)$$

Как следует из вышесказанного, расчёт потерь холода осуществляется с определения величины коэффициента теплоотдачи k . Введение добавок ПАВ в основной хладоноситель ШУКВ по существу приводит к снижению диссипативных теплообменных холодопотерь. Поэтому представляется целесообразным рассчитывать величину α_w как функцию величины снижения гидродинамического сопротивления

$$\alpha_w = \alpha_w \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right).$$

Гидродинамическая теория теплообмена, основанная на идеях Рейнольдса, Прандтля и др., даёт следующее выражение

$$\alpha_w = \frac{\lambda}{8} C_p \rho w_{cp} E . \quad (10.77)$$

Здесь λ – коэффициент сопротивления трения; C_p – теплоёмкость, ккал/кг·град.; ρ – плотность хладоносителя, кг/м³; E – поправка, учитывающая движение жидкости и перенос теплоты в пристеночном слое.

Выражение (10.76) справедливо при условиях, что рассматриваемое движение является турбулентным и отсутствуют большие градиенты давления, течение жидкости происходит безотрывочно.

При выполнении вышеперечисленных условий, получим

$$E = \frac{1}{1 + 12 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} . \quad (10.78)$$

Здесь Pr – безразмерный критерий Прандтля. Качественный анализ выражения для коэффициента теплопередачи k свидетельствует о незначительном влиянии на него снижающих сопротивление добавок, а, следовательно, будет малым влияние добавок и на весь процесс теплообмена. Действительно, по порядку величины значения величин α_w и α существенно различны. Так значения α_w лежат в интервале $10^3 \div 10^5$, а значение α – в интервале $10^0 \div 10^1$. Это обуславливает то, что изменение величины α_w за счёт введения добавок ПАВ практически не оказывает влияния на величину k .

В подтверждение сказанному, в таблице 10.1 приведены результаты расчёта для трубопровода диаметром 360 мм.

Таблица 10.1

Результаты расчёта величины эффекта снижения холодопотерь для трубопровода диаметром 360 мм

№ п/п	Q_x , ккал	$\Delta\lambda/\lambda$, %	$\Delta Q_x/Q_x$, %
1.	60.752	0	0
2.	60.629	20	0.202
3.	60.606	40	0.24
4.	60.584	60	0.27
5.	60.538	80	0.38

Другим фактором, отрицательно влияющим на тепловой режим в холодильных установках, является диссипация механической энергии движущегося хладоносителя в тепло. Диссипативные потери были оценены для труб диаметром 360 и 100 мм (см. табл. 10.2). При расчёте предполагалось, что вся затрачиваемая мощность переходит в тепло.

Формула для расчёта мощности записывается в виде:

$$N_{\text{затр}} = \Delta P_{\text{сист.}} \cdot Q_w, \quad (10.79)$$

где $\Delta P_{\text{сист.}}$ – потери давления в системе, определяемые по формуле:

$$\Delta P_{\text{сист.}} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho U_{\text{ср}}^2}{2}. \quad (10.80)$$

Таблица 10.2

Диссипативные потери энергии для гладких и шероховатых ($\Delta = 0.045 \div 0,050$) труб диаметром $\varnothing = 100$ и 360 мм.

№ п/п	Δ , мм	$\Delta\lambda/\lambda$, %	$\varnothing = 360$ мм		$\varnothing = 100$ мм									
			q , м ³ /с	Q_x , ккал	q , м ³ /с	Q_x , ккал	q , м ³ /с	Q_x , ккал	q , м ³ /с	Q_x , ккал	q , м ³ /с	Q_x , ккал		
1.	0	0	0,11	337.6	0,01	0,015	557	0,025	1422	0,03	1853			
2.		20		277.5							197	423	1070	1491
3.		40		195.0							147	315	796	1112
4.		60		129.0							98	211	535	745
5.		80		0.011							63.0	48	104	279
1.	0,045–0,05	0	–	–	0,01	0,015	978	0,025	2720	0,03	9344			
2.		20	–	–							347	781	2172	3139
3.		40	–	–							260	584	2019	3058
4.		60	–	–							175	390	1090	1567
5.		80	–	–							85	205	544	782

Наиболее подробный анализ процесса диссипации был проведен для труб диаметром 100 мм. Для расчёта был взят контрольный участок трубы длиной $L = 1000$ м. Полученные результаты отражены графически (рис. 10.8).

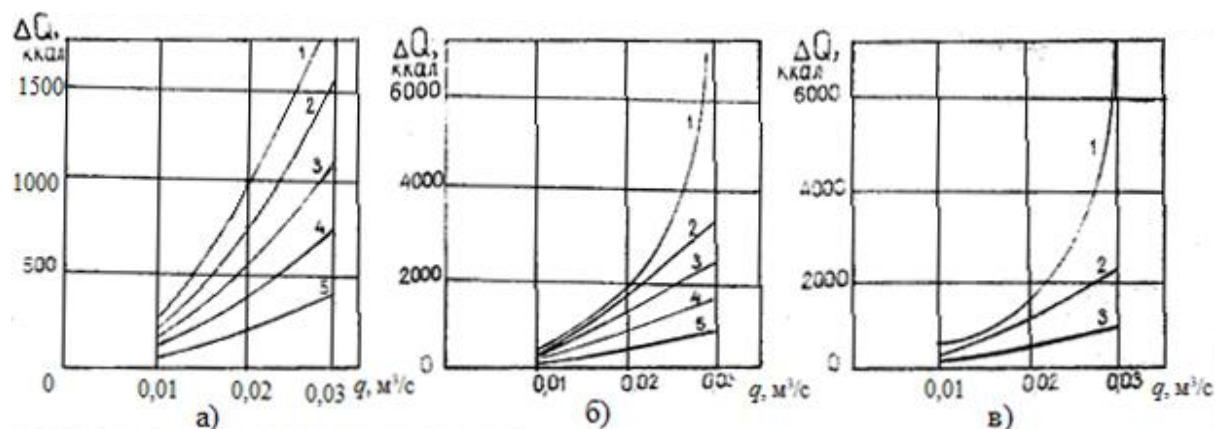


Рисунок 10.8 Влияние величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления на магистральные холодопотери на участке длиной 1000 м ($\varnothing = 100$ мм):

- а) в гладких трубах: 1, 2, 3, 4, 5 – соответствуют эффектам 20%; 40%; 60%; 80%;
- б) в шероховатых трубах ($\Delta = 0.045 \div 0,050$): 1, 2, 3, 4, 5 – соответствуют эффектам 20%; 40%; 60%; 80%;
- в) вода: шероховатая труба – 1; гладкая труба – 2; хладоноситель со сниженным на 80% сопротивлением: шероховатая труба – 3.

Результаты относятся к гладким и шероховатым трубам. Видно, что добавки ПАВ существенно снижают диссипативные потери как в гладких, так и в шероховатых трубах. Причём диссипативные потери в шероховатых трубах при максимальном эффекте снижения гидродинамического сопротивления меньше, нежели диссипативные потери на гладких трубах без добавок.

Значительное влияние добавок ПАВ на процесс диссипации следует понимать как ещё одно доказательство целесообразности их применения в холодильной технике.

10.2.4. Влияние ГДАД на работу теплообменных аппаратов

В ДонНУ, с использованием промышленной пасты «метаупон» был разработан состав основного хладоносителя со сниженным ГСТТ в напорных трубопроводах шахтной установки кондиционирования воздуха (ШУКВ) [264].

Как уже отмечалось, введение в поток жидкости гидродинамически-активных добавок мицеллообразующих МПАВ приводит к уменьшению турбулентного теплообмена. Это может ухудшить тепловой режим работы холодильной установки. В связи с этим были проведены специальные исследования по влиянию добавок МПАВ на холодопроизводительность типового воздухоохладителя (типа АРВЭ) и жидкостного кожухотрубного теплообменника [298].

Зависимость коэффициента теплоотдачи K в жидкостном теплообменнике от расхода хладоносителя q до и после введения добавок МПАВ приведена на рис. 10.9.

Видно, что в области малых расходов введение МПАВ приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи. В диапазоне рекомендуемых расходов ($20-35 \text{ м}^3/\text{час}$) в случае, если содержание ПАВ в хладоносителе не превышает $\sim 1,2 \%$, коэффициент теплоотдачи практически равен коэффициенту K для воды.

Оценку холодопроизводительности воздухоохладителя, с использованием в качестве хладоносителя водно-солевых растворов метаупона, проводили путем сравнения данных нормализованной холодопроизводительности до (Q_0), и после введения добавок (Q_p).

На рис. 10.10 приведена зависимость относительной холодопроизводительности воздухоохладителя АРВ-1 от расхода q хладоносителя с добавками ПАВ (технической пасты метаупон).

Видно, что введение в хладоноситель добавок метаупона в области концентраций до $\sim 1,2\%$, при $q > 20 \text{ м}^3/\text{час}$ практически не влияет на холодопроизводительность данного воздухоохладителя.

В связи с вышеизложенным можно сделать вывод, что влияние добавок МПАВ на работу теплообменных аппаратов накладывает определенные

ограничения на верхний предел концентрации МПАВ в хладоносителе. Однако, с гидродинамической точки зрения, эти ограничения не существенны, т.к. в разработанном хладоносителе [264] оптимальная концентрация метаупона лежит в диапазоне 1,0-1,85 %.

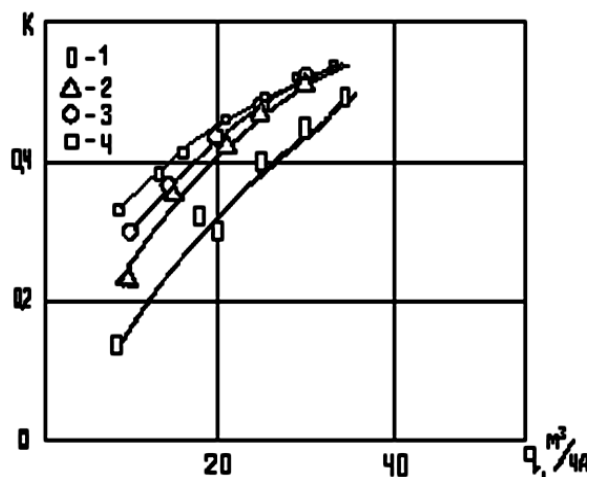


Рисунок 10.9 Зависимость коэффициента теплоотдачи в кожухотрубном теплообменнике ТВД от расхода хладоносителя. 1-4-концентрация метаупона 2,17; 1,18; 0,88 и 0 %, соответственно; содержание хлористого натрия в хладоносителе 7,5 % вес. Данные работы [298]

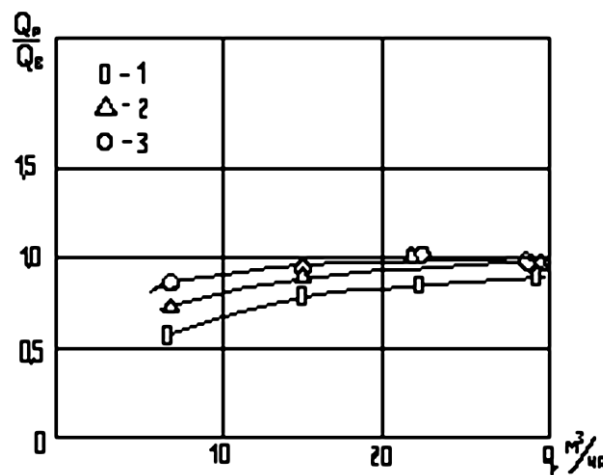


Рисунок 10.10 Зависимость отношения нормализованных холодопроизводительностей воздухоохладителя АРВЭ-1 от расхода хладоносителя. 1-3- концентрация метаупона 2,17; 1,18 и 0,88 %, соответственно. Содержание хлористого натрия в хладоносителе 7,5 % вес. Данные работы [298]

Таким образом, результаты лабораторных исследований и натурных испытаний показывают возможность практического использования хладоносителей на основе мицеллообразующих поверхностно-активных веществ в замкнутых гидравлических системах.

Список использованных литературных источников

1. Повх И.Л. Экспериментальное исследование турбулентного течения водных растворов полимера в трубе/ И.Л. Повх, А.Б. Ступин// Инженерно-физический журнал. - 1972. - Т. 22, № 1. - С. 59-65.
2. Повх И.Л. Влияние добавок полиакриламида на снижение гидравлических потерь в водных потоках с твердыми частицами /И.Л. Повх, А.Б. Ступин// Инженерно-физ. журнал, 1972. - Т. 22, № 5. - С.919-921.
3. Хойт Д.У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости/ Д.У. Хойт // Труды американского общества инженеров - механиков. Серия D. Теоретические основы инженерных расчётов.- 1972.- № 2.- С. 1-31.
4. Повх И.Л. Проблема зменшення турбулентного тертя добавками/ І.Л. Повх, О.Б. Ступін// Вісник АН УРСР.- 1979.- № 10.- С. 55-65.
5. Седов Л.И. Трение и теплообмен в пристенных турбулентных потоках жидкости с полимерными добавками/ Л.И. Седов, В.А. Иоселевич, В.Н. Пилипенко// В сб.: Турбулентные течения.- М.: Наука.- 1977.- С. 7-19.
6. Повх И.Л. Снижение гидродинамического сопротивления добавками /И.Л. Повх, А.Б. Ступин // В сб.: Физическая гидродинамика.- Киев-Донецк: Вища школа.- 1977.- С. 7-19.
7. Симоненко А.П. Гидродинамически-активные композиции на основе полимеров и поверхностно-активных веществ для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01. – Донецк, 2013. – 397 с.
8. Ступин А.Б. Пристенное турбулентное течение жидкости с добавками поверхностно-активных веществ/ А.Б. Ступин, С.Н. Максютенко, П.В. Асланов, А.П. Симоненко// В сб.: Физическая гидродинамика.- Киев-Донецк: Вища школа.- 1977.- С. 19 - 24.
9. Повх И.Л. Снижение гидродинамического сопротивления добавками поверхностно-активных веществ / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, В.М. Добрыченко, С.Н. Максютенко// Инженерно-физический журнал.- 1974.- Т. 27, № 4.-С. 682-685.
10. Повх И.Л. Исследование турбулентного течения растворов поверхностно-активных веществ лазерным анемометром / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, С.Н. Максютенко и др. // Инж.-физ. журнал.- 1975.- Т. 29, № 5. - С. 853-856.
11. Повх И.Л. Снижение гидродинамического сопротивления взвесенесущих потоков добавками полимеров и поверхностно-активных веществ / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, С.Н. Максютенко, В.М. Добрыченко// Известия ВУЗов. Энергетика.– 1975.- № 4. – С.101-103.
12. А.С. № 483538 СССР, кл. F15D1/12 Демпфирующее покрытие / В.В. Бабенко, Л.Ф. Козлов, В.И. Коробов // Б.И. - 1975.- № 33.
13. Воропаев Г.А. Моделирование турбулентных сложных течений/ Г.А. Воропаев, Ю.А. Птуха// - Киев: Наукова думка.- 1991.- 168 с.
14. Кулик В.М. Экспериментальное исследование воздействия

однослойных вязкоупругих покрытий на турбулентное трение и пульсации давления на стенке / В.М. Кулик, И.С. Погуда, Б.Н. Семёнов// Инженерно-физический журнал.- 1984.- Т.47, №2.- С.189-196.

15. Барбанель Б.А. Некоторые практические приложения теории управления пограничным слоем / Б.А. Барбанель, В.Г. Богдевич, Л.И. Мальцев, А.Г.Малюга// Санкт-Петербург: СПМБМ "Малахит".- 1994,- 48с.

16. Семенов Б.Н. Эксперимент по снижению турбулентного сопротивления при совместном использовании податливого покрытия газовых микропузырьков и полимерных добавок / Б.Н. Семенов, А.И. Амиров, В.М. Кулик и др. // Теплофизика и Аэродинамика.- 1999.- Т. 6, № 2.- С. 225-234.

17. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд., доп. / И.Л. Повх. - М.-Л.: изд-во "Машиностроение", 1976. – 504 с.

18. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика /Б.Т. Емцев. - М.: Машиностроение, 1978. - 463 с.

19. Черняк О.В. Основы теплотехники и гидравлики /О.В. Черняк. - М.: Высшая школа, 1974, - 287 с.

20. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления /А.Д. Альтшуль. - М.: Недра, 1970, 215 с.

21. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям /И.Е. Идельчик. - М.: Машиностроение, 1975, 560 с.

22. Ступин А.Б. Теория деструкции полимерных молекул в турбулентном потоке /А.Б. Ступин// Научные основы турбулентных явлений/ РАН. Отд. мех.-мат. методов в технологических и экономических разработках при Президиуме РАН.– М.- 1992.– С. 97–108.

23. Ступин А.Б. Кинетическая теория деструкции полимерных молекул в турбулентном потоке /А.Б. Ступин// Вісник Донецького університету. Серія А. Природничі науки.- 1997.- № 1.- С. 120-127.

24. Седов Л.И. О снижении гидродинамического сопротивления добавками полимеров / П.И. Седов, Н.Г. Васецкая, В.А. Иоселевич, В.Н. Пилипенко// В сб.: Механика турбулентных потоков.- М.: Наука,- 1980.- С. 7-28.

25. Meulen J. Friction reduction and degradation in turbulent flow of dilute polymer solutions/ J. Meulen // Appl. Sci. Res.- 1974.- Vol. 29, No. 3.- P. 161-174.

26. Анисимов И.А. Зависимость деструкции водного раствора полиэтиленоксида от работы сил трения /И.А. Анисимов, П.И. Седов// В сб.: Турбулентные сдвиговые течения неньютоновских жидкостей.- Новосибирск: ИТФ СО АН СССР.- 1981.- С. 14-38.

27. Амиров А.И. Динамика эффекта Томса для растворов полиэтиленоксида / А.И. Амиров, В.М. Кулик, Б.Н. Семёнов // В сб.: Термогазодинамика турбулентных течений.- Новосибирск: ИТФ СО

АН СССР.- 1986.- С. 58-75.

28. Тагер А.А. Физико-химия полимеров/ А.А. Тагер- М.: Химия .- 1978.- 544 с.

29. Калиниченко Н.М. Растворение набухающих частиц в турбулентном потоке жидкости /Н.М. Калиниченко, С.С. Квашнина, В.Н. Пилипенко// В сб.: Гидрогазодинамика течений с тепломассообменом.- Устинов: УПИ.- 1986.- С. 59-68.

30. Лебян Ю.П. Повышение эффективности использования гидродинамически активных материалов/ Ю.П. Лебян, А.Б. Дворянчикова, Б.А. Барбанель // Минск: БелНИИТИ.- 1989.- 51 с.

31. Yih-O. Tu Model for the kinetics of polymer dissolution // IBM, Journal. Research and Development / Yih-O. Tu, A.C. Ouano //- 1977. - Vol. 21, No. 2. - P. 131-142.

32. Yih-O Tu Multi-phase Stefan problem describing the swelling and the dissolution of glassy polymer / Yih-O. Tu// Quart. Appl. Math.- 1977/- Vol. 35, No.2.- P. 14-20.

33. Quano A.C. Dissolution dynamics of some polymers: solvent-polymer boundaries / A.C. Quano, J.A. Carathers // Polymer Eng. and Sci.-1980.-Vol. 20, No. 2. P. 160-166.

34. Белоусов Ю.П. Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей/ Ю.П. Белоусов. - Новосибирск: «Наука», 1986. - 144 с.

35. Повх И.Л. Высококонцентрированная композиция для снижения гидродинамического сопротивления воды / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко и др. // Заявка № 4537620 /05/ 14143 от 21.12.1990г., полож. реш. Госкомизобретений СССР на выд. патента от 27.02.1992 г.

36. Ступин А.Б. Быстрорастворимая суспензия полиакриламида и способ ее получения / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.И. Сердюк и др.// А.с. № 1620459.- Оpubл. в Б.И.- 1991, № 2.

37. Ступин А.Б. Пути повышения эффективности использования суспензий полиэтиленоксида, уменьшающих гидродинамическое сопротивление воды/ А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.И. Сердюк, Б.А. Барбанель// Тезисы докл. IV Всесоюзн. конф. "Водорастворимые полимеры и их применение".- Иркутск.- 1991.- С. 237.

38. Ступин А.Б. Полимерные композиции для увеличения пропускной способности пожарных трубопроводов / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.И. Сердюк и др. // Тезисы докл. IV Всесоюзн. конф. "Водорастворимые полимеры и их применение".- Иркутск.- 1991.- С. 243.

39. Ступин А.Б. Суспензия полиакриламида / А.Б. Ступин, А.И. Сердюк, А.П. Симоненко и др. // А. с. 1736980, - БИ. – 1992, № 20.

40. Ступин А.Б. Применение водорастворимых полимерных композиций в энергосбережении и экологии / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, П.В. Асланов // В сб. научн. трудов регионального научно-практического

семинара "Оценка техногенного воздействия на природную среду. Новые технологии очистки промвыбросов, возвратных вод, переработки и утилизации отходов", Кременчуг.- 1996, с. 89 - 94.

41. Ступин А.Б. Проточная кассета с твёрдым водорастворимым полимерным брикетом / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.Ю. Собко // Тезисы международной конф. "Славутич" по вопросам улучшения экологического состояния природных вод Днепра.- Кременчуг.- 1996.- С. 118-119.

42. Ступин А.Б. Применение твердых водорастворимых полимерных композиций для повышения эффективности пожаротушения / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, Н.В. Быковская // Тези докл. вузовс. конф. проф.-викладацького складу за підсумками наук.-дослідної роботи. Математика, фізика, екологія.- Донецьк: ДонДУ.-1997. - С. 177-178.

43. Повх И.Л. Гидродинамические и технологические аспекты применения добавок снижающих турбулентное трение жидкостей / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, П.В. Асланов и др.//Тезисы докл. II Республ. конф. "Гидроаэромеханика в инженерной практике".- Киев-Черкассы.- 1997.- С. 47-49.

44. Ступин А.Б. Повышение эффективности пожаротушения путём применения твёрдых водорастворимых полимерных композиций / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, Н.В. Быковская //Тезисы докл. II Республ. конф. "Гидроаэромеханика в инженерной практике".- Киев - Черкассы.- 1997.- С. 60-61.

45. Stupin A.B. The application of hydrodynamic active additives of polymers and surfactant substances in energy-saving technology / A.B. Stupin, A.P. Simonenko, P.V. Aslanov, N.V. Bykovskaya // Proceedings of the 11th European Drag Reduction Working Meeting.- Prague, Czech Republic.- 1999. - P. 46-47.

46. Ступин А.Б. Применение микродобавок полимеров и МПАВ для повышения эффективности работы шахтных противопожарных систем / А.Б. Ступин, Б.С. Любарский, А.И. Сердюк, А.П. Симоненко // Тез. докл. вузовс. науч. конф. проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. работы. Естественные дисциплины.- Донецк, апрель 1993г.). Донецк: ДонГУ. - 1993. - С. 42.

47. Ступин А.Б. Повышение эффективности работы пожаротушающего оборудования путём применения микродобавок высокомолекулярных полимеров/ А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, Н.В. Быковская и др.// Сб. трудов научно-практ. конф. "Пути развития горноспасательного дела", Донецк, 1997, доп. вып.- С. 9-11.

48. Ступин А. Б. Гидродинамически-активные полимерные композиции в пожаротушении / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, П.В. Асланов, Н.В. Быковская – Донецк: ДонНУ, 2001. – 149 с.

49. Ступин А.Б. Повышение разрушающей способности жидкостных

импульсных струй, создаваемых гидромонитором комбинированного действия / А.Б. Ступин, Б.С. Любарский, А.Н. Федорин и др. // Тезисы докл. вузовск. науч. конф. проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. работы. Естественные дисциплины. - Донецк: ДонГУ. - 1993. - С. 39.

50. Ступин А.Б. Повышение разрушающей способности импульсных струй путем применения гидродинамически-активных добавок / А.Б. Ступин, Б.С. Любарский, А.П. Симоненко, В.С. Коломиец, В.В. Гулин // В сб.: Теоретическая и прикладная механика.- Харьков: Основа.- 1995. Вып. 25. - С. 126 - 130.

51. Ступин А.Б. Повышение эффективности работы гидроструйного оборудования путём применения гидродинамически активных добавок / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, П.В. Асланов и др // Сб. трудов научно-практ. конф. "Пути развития горноспасательного дела", Донецк, 1997, доп. вып.- С. 6-9.

52. Stupin A.B. Increase of destroying ability of pulsing jets by application of hydrodynamically-active substances / A.B. Stupin, A.P. Simonenko, B.S. Lubarskiy et al // In: Proc. of the International conf. GEOMECHANICS-96.- A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.- 1997.- P. 319-321.

53. Ступин А.Б. Применение гидроструйных технологий для резки различных материалов в особо опасных условиях / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, П.В. Асланов и др. // В сб. трудов научн.-практ. конф. "Оценка техногенного воздействия на окружающую природную среду. Новые технологии очистки промвыбросов, возвратных вод, переработка отходов".- Кременчуг.- 1997.- С. 43-45.

54. Ступин А.Б. Повышение эффективности гидроструйной резки конструкционных материалов / А.Б. Ступин, П.В. Асланов, С.А. Фоменко и др.//Международный сб. научных трудов "Прогрессивные технологии и системы машиностроения".- Донецк: ДонГТУ.-1998.- Вып. 6, т.3.- с. 145-148.

55. Ступин А.Б. Гидрорезный комплекс для ремонтно-восстановительных работ на нефтегазопроводах и нефтехранилищах / А.Б. Ступин, П.В. Асланов, С.А. Фоменко и др. // Матеріали Міжнародної науково-технічної наради "Екологія в нафтогазовій промисловості"/ Вісник УБЕНТЗ.- К.: тов-во "Знання". № 7, 1998.- С. 72-73.

56. Karpachev Y.A. Radiation Hardened Telerobotic Chassis Construction / Y.A. Karpachev, A.B. Stupin et al. //Report on contract № B313820 with LLNL University of California, 1995, IBSRI MP "Ritm", Kiev, Chernobyl, 140 p.

57. Povkh I.L. Turbulent heat transfer in dilute surfactant and polymer solutions /I.L. Povkh, A.B. Stupin, P.V. Aslanov et al // Heat Transfer-Soviet Research.- 1978.- Vol. 10, No.1.- p.98-105.

58. Ступин А.Б. Максимальное снижение турбулентного трения в водных растворах метаупона/ А.Б. Ступин, А.П. Симоненко // Известия ВУЗов. Энергетика.- 1979.- № 11. – С. 124-126.

59. Повх И.Л. Исследование гидродинамического сопротивления водных растворов полимеров и поверхностно-активных веществ в шероховатых трубах/ И.Л. Повх, А.Б. Ступин, Г.Г. Бояркина // Инженерно-физический журнал.- 1979.- Т. 36, № 1.- С.16-19.

60. Повх И.Л. Особенности турбулентных течений растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, С.Н. Максютенко и др. // В сб.: Механика турбулентных потоков, М.: Наука. - 1980.- С. 44 - 69.

61. Асланов П.В. Турбулентные течения растворов поверхностно-активных веществ / П.В. Асланов, И.Л. Повх, А.Б. Ступин и др. // Известия АН СССР Механика жидкости и газа.- 1980.- № 1.- С. 36-43.

62. Повх И.Л. Применение поверхностно-активных веществ для уменьшения трения жидкостей в технологических аппаратах/ И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко // В кн.: Аэродинамика в технологических процессах.- М.: Наука.- 1981. - С. 230 - 240.

63. Повх И.Л. О связи снижения турбулентного трения и жидкокристаллического состояния в растворах мицеллообразующих ПАВ / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко // Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции по поверхностно-активным веществам и сырью для их производства.- Волгодонск.- 1984.- С. 208-209.

64. Ступин А.Б. О стабильности гидродинамической эффективности растворов метаупона / А.Б. Ступин, Л.В. Гончаренко, В.О. Самуйлов// Деп. в УкрНИИТИ 23.06.1986, № 751-Ук86Деп.

65. Повх И.Л. Повышение эффективности работы шахтных стационарных холодильных установок / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.И. Пархоменко// Безопасность труда в промышленности.- 1979.- № 9.- С. 26-27.

66. Повх И.Л. Влияние мицеллообразующих ПАВ на сопротивление и теплообмен в энергетических установках / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, П.В. Асланов // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Тепломассообмен и моделирование в энергетических установках". - Тула, Тульский политехн. ин-т.- 1979.- ч. III.- С. 260-261.

67. Повх И.Л. Влияние поверхностно-активных веществ на снижение гидродинамического сопротивления хладоносителей / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко / Холодильная техника.-1979.- № 7.- С. 36-39.

68. Повх И.Л. Применение добавок мицеллообразующих ПАВ для повышения эффективности работы холодильных систем / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Проблемы использования вторичных энергоресурсов химическими предприятиями для получения холода, тепла и электроэнергии". - Л.: ЛТИ.- 1979.- С. 133-134.

69. Дегопа Н.Н. Высокомолекулярный полиакриламид - новый эффективный реагент для извлечения вольфрама из сточных вод

металлургических производств / Н.Н. Дегопа, Т.А. Смержевская, А.Б. Ступин // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Экология промышленного региона". - Донецк. - 1991. - С. 157-158.

70. Ступин А.Б. Проблемы создания микроклимата в животноводческих помещениях и возможные пути их решения / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, Г.Н. Молодан и др. // Тез. докл. вузовс. науч. конф. проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. работы. Естественные дисциплины.-Донецк: ДонГУ.-1993.- С. 40-41.

71. Ступин А.Б. Очистка сточных вод животноводческих комплексов модифицированным высокомолекулярным флокулянтном / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.Ю. Собко // Тез. докладов вузовс. конф. проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. работы. Математика, физика.- Донецк: ДонГУ, 1995. - С. 106.

72. Ступин А.Б. Эффективный способ нейтрализации источника загрязнения / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.Ю. Собко // Тез. докладов вузовс. конф. проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. работы. Математика, физика.- Донецк: ДонГУ, 1995. - С. 107-108.

73. Собко О.Ю. Застосування коагулянтів та флокулянтів для очищення шахтних вод від твердих домішок / О.Ю. Собко, О.Б. Ступін, О.П. Симоненко // Сучасні проблеми водопостачання і знешкодження стічних вод. Сб. докладів и тезисів Українсько-Польської науково-технічної конференції "Сучасні проблеми водопостачання і знешкодження стічних вод".- Львів.- 1996. - С. 481-482.

74. Ступин А.Б. Очистка стоков животноводческих комплексов от взвешенных частиц / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.Ю. Собко // В сб. докладов региональной конференции "Экологические проблемы малых рек Донбасса и пути их решения".- Донецк.- 1996.- С. 31-32.

75. Ступин А.Б. Эффективный способ создания нормального микроклимата в животноводческих помещениях / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.Ю. Собко // В сб.: Проблемы создания новых машин и технологий. Науч. труды Кременчугского гос. политех. ин-та.- Кременчуг.- 1997.- Вып. 2., Ч. 2. - С. 43-45.

76. Ступин А.Б. Очистка сточных вод от взвешенных веществ модифицированным высокомолекулярным коагулянтном / А.Б. Ступин, А.Ю. Собко // Тези докл. вузовс. конф. проф.-викладацького складу за підсумками наук.-дослідної роботи. Математика, фізика, екологія.- Донецьк: ДонДУ.-1997. - С. 116 - 117.

77. Ступин А.Б. О связи значений коэффициента Крайчнана с величиной эффекта снижения турбулентного трения / А.Б. Ступин, В.О. Самуйлов // Деп. В УкрНИИТИ 15.01.88., г. Донецк, 1988, 29 с.

78. Самуйлов В.О. Улучшение виброакустических характеристик гидравлических систем путем применения гидродинамически-активных веществ/ В.О. Самуйлов, А.П. Симоненко// В сб.: Проблемы создания новых

машин и технологий, вып. 2, ч. II, Кременчуг, 1997, с. 48-51.

79. Ступин А.Б. Оборудование для обработки сточных вод высокомолекулярным флокулянтom / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, А.Ю. Собко // В сб.: научн. труд. регионального научно-практического семинара "Оценка техногенного воздействия на природную среду. Новые технологии очистки промвыбросов, возвратных вод, переработки и утилизации отходов", Кременчуг.-1996, С.85-88.

80. Симоненко О.П. Мобільний пристрій для високоефективного очищення стічних вод промислових підприємств / О.П. Симоненко, П.В. Асланов, О.Ю. Собко, О.Г. Славний // Зб. доповідей-тез Українсько-Польської наук.-техн. конф. "Сучасні проблеми водопостачання і знешкодження стічних вод". - Львів.- 1996.- С. 479-480.

81. Schultz Michael P. Turbulent boundary layers over surfaces smoothed by sanding / Schultz Michael P., Flack Karen A. // Trans ASME. J. Fluids Eng. – 2003. – 125, № 5. – P. 863-870.

82. Яхно О. М. Снижение гидравлического сопротивления потока ньютоновской жидкости путем нанесения кремнийорганического покрытия на стенки канала / О. М. Яхно, Н. М. Мамедов, А. И. Горбатов // Гидравлика и гидротехника (Киев). – 1988. – № 46. – С. 69-72.

83. Mutsumura Kunihito. Снижение сопротивления на сверхводонепроницаемой поверхности с помощью впрыскивания воздуха. Сообщение 2. Механизм снижения сопротивления / Mutsumura Kunihito, Kaminaga Fumito, Saito Hiroshi // Nihon kikai gakkai ronbunshu. B=Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B. – 2002. – 68, № 671. – p. 1864-1870.

84. А. с. 1195129 СССР, МКИ F 17D 1/08. Способ транспорта воды / [С. В. Зайцев, О. В. Смирнов, А. В. Никифоров и др.] (СССР). – № 3737812/25-08. заявл. 07.05.84; опубл. 30.11.85, Бюл. № 44.

85. Bushnell D. M. Turbulent drag reduction for external flows / D. M. Bushnell // AIAA Pap. – 1983. – № 227. – 20 p.

86. Choi Kwing-So. European drag-reduction research – recent developments and current status / Choi Kwing-So // Fluid Dyn. Res. – V. 26, № 5. – 2000.– S. 325-335.

87. Löbert G. Turbulent drag reduction by laminar sublayer thickening / G. Löbert // 10th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Palo Alto, Calif., June 22-24, 1992: Collect. Techn. Pap. Pt 2. –Washington, 1992. – P. 796-800.

88. Almeida J. A. Local and average transport coefficients for the turbulent flow in internally ribbed tubes / J. A. Almeida, Mendes P. R. Souza // Exp. Therm. And Fluid Sci. – 1992. – V. 5, № 4. – P. 513-523.

89. Choi K.-S. Possibility of drag reduction using d-type roughness / K.-S. Choi, N. Fujisawa // Appl. Sci. Res. – 1993. – V. 50, № 3-4. – P.315-324.

90. Kameda Takatsugu. Турбулентные структуры в окрестности элемента k-шероховатости в пограничном слое на шероховатой стенке / Kameda Takatsugu, Osaka Hideo, Mochizuki Shinsuke // Nihon kikai gakkai

ronbunshu. B=Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. – В. 66, № 646. – 2000. – S. 1347-1355.

91. Mochizuki Shinsuke. Coherent structure of a d-type rough wall boundary layer in a fully rough regime. Results with the four-quadrant analysis / Mochizuki Shinsuke, Osaka Hideo // Yamaguchi daigaku kogakubu kenkyu hokoku. = Mem. Fac. Eng. Yamaguchi Univ. – 1992. – V. 42, № 2. – P. 207-214.

92. Ковальногов Н. Н. Течение и сопротивление трения турбулентного потока в перфорированной трубе с демпфирующими полостями / Н. Н. Ковальногов., Л. В. Хахалева // Изв. вузов. Авиац. техн.– 2002. – № 3. – С. 19-21.

93. Повх И. Л. Гидродинамика труб переменного сечения / И. Л. Повх, Н. В. Фиошин // Инж.-физическ. журн. – 1992. – Т. 62, № 4. – С. 525-533.

94. Абиев Р. Ш. Исследование течения газожидкостной системы в трубе с периодически меняющимся сечением / Р. Ш. Абиев // Хим. промышленность.– № 12.– 2003.– С. 10-17.

95. А. с. 1714232 СССР, МКИ F 15D 1/04. Способ уменьшения гидравлического сопротивления трубопровода / И. В. Фадеев, Ю. Л. Лашков, В. В. Михайлов, Г. В. Енютин (СССР). – № 4626901/29; заявл. 27.12.88; опубл. 23.02.92, Бюл. № 7. – 2 с.

96. Повх И. Л. Уменьшения турбулентного трения – основное джерело економії енергії / И. Л. Повх // Вісн. АН УРСР. – 1982. – №11. – С. 66-74.

97. Повх И. Л. Гидродинамика и жизнь / И. Л. Повх. – К.: Общество “Знание” УССР, 1981. – 64 с.

98. А. с. 1455074 СССР, МКИ F 15D 1/04. Колено трубопровода / М. В. Коротков// – № 4114736/25-29; заявл. 08.09.86; опубл. 30.01.89, Бюл. №4.

99. А. с. 1617239 СССР, МКИ F 17D 1/16. Устройство для транспортирования высоковязких структурированных жидкостей по трубопроводу /Ю. П. Сафонов, Г. П. Корешев, В. Н. Новопашенный, А. Л. Рождественский// – № 4385229/23-29; заявл. 29.02.88; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.

100. А. с. 1129432 СССР, МКИ F 15 D 1/02, F 17 D 1/20. Способ перекачки жидкости по упругому трубопроводу /Н.К. Надиров, М.С. Сагов, О.И. Чуркина, О.И. Потешкина// – № 3633505/25-08; заявл. 01.09.83; спубл. 15.12.84, Бюл. № 46. – С. 121.

101. Konieczny Philippe Control of turbulent streaks by active wall movement /Philippe Konieczny, Alexis Renotte, Bertrand Nogarede, Alessandro Bottaro// Proc. 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2004): Abstract and CD-ROM Proceedings. – Warszawa: IPPT PAN. – 2004.– P. 113.

102. Кулик В.М. Отклик податливого покрытия на турбулентные пульсации давления / В.М. Кулик, С.Л. Морозова // Тепл. и аэр. – 2001. – Т. 8, № 1. – С. 59-75.

103. А. с. 887821 СССР, МКИ F 15D 1/04. Колено трубопровода / Р. С. Сагадаев, Э. И. Попов, А. Н. Харламов// – № 2776670/25-06; заявл. 07.06.79; опубл. 07.12.81, Бюл. № 45.

104. А. с. 1341443 СССР, МКИ F 17D 1/20. Способ ускорения движения жидкости в трубопроводе / В. И. Гуляев, Л. В. Тышкевич (СССР).– № 4022064/40-08; заявл. 07.02.86; опубл. 30.09.87, Бюл. № 36.

105. Турсунов Б. С. Расчет турбулентных напряжений в напорном течении вязкой несжимаемой жидкости во вращающейся трубе / Б.С. Турсунов// Новожил. сб.: Сб. тр., посвящ. 80-летию со дня рожд. акад. В. В. Новожилова.– СПб. – 1992 – С. 225-234.

106. Lee Changhoon. Control of the viscous sublayer for drag reduction (Proc. Symposium in honor of John L. Lumley on his 70 Birthday “The Turbulent Years: John Lumley at 70”, Ithaca, N Y, 24-25 June, 2001) / Lee Changhoon, Kim John // Phys. Fluids. – 2002. – 14, № 7. – P. 2523-2529.

107. А. с. 1573291 СССР, МКИ F 17D 3/00. Устройство для переформирования потока в трубопроводе / П. Ф. Тюриков, А. В. Дементьев, В. С. Петровский// – №4410575/23-29; заявл. 15.04.88; опубл. 23.06.90, Бюл. № 23.

108. Заявка 62-49520 Япония, МКИ F 17D 1/18, F 16L 53/00. Способ трубопроводной транспортировки сырой нефти / Сёва дэнки когё К. К., Ниппон кокан К. К. (Япония). – № 54-40708; заявл. 04.04.79; опубл. 20.10.87, РЖ Изобретения ..., Вып. 95. 1988, № 10. – С. 8.

109. Коробов В. И. Комплексное влияние податливости поверхности и высокомолекулярных полимерных добавок на турбулентное трение / В. И. Коробов // Прикладна гідромеханіка. – 2000. – № 2. – С. 59-63.

110. Чернюк В. В. Пониження турбулентного тертя в трубопроводах дією на потік / В.В. Чернюк // Вестн. нац. техн. ун-та України "Киев. политехн. ин-т". Машиностроение. Выпуск 38. Т. 2. – Киев: НТУУ КПИ. – 2000. – С. 192-197.

111. А. с. 1574929 СССР, МКИ F 15D 1/02. Устройство для получения заданных эшпор скоростей газового потока / А. А. Афанасьев, С. И. Ковыркин (СССР).– № 4196667/40-29; заявл. 20.02.87; опубл. 30.06.90, Бюл. № 24.

112. А. с. 1240968 СССР, МКИ F 15D 1/04. Устройство для изменения характеристик потока в канале / М. И. Пончек (СССР).– № 3512121/25-06; заявл. 18.11.82; опубл. 30.06.86, Бюл. № 24.

113. Зарянкин А. Е. Некоторые пути гашения вихревого движения и практическое использование противовихревых решеток / А. Е. Зарянкин, А. Н. Парамонов, С. И. Чусов, В. А. Зарянкин // (Московский энергетический институт). Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 23-27.

114. А. с. 994822 СССР, МКИ F 15D 1/02, F 16L 55/00. Устройство для снижения трения жидкостей в трубопроводе / А. Ф. Легких// – № 3362768/25-06; заявл. 09.12.81; опубл. 07.02.83, Бюл. № 5.

115. А. с. 1681072 СССР, МКИ F 15D 1/02. Устройство для снижения гидравлических потерь в ступенчато расширяющихся трубопроводах / Р. С. Гурбанов, С. И. Бахтияров, Т. С. Сулейманов (СССР).– № 4653928/29; заявл. 19.12.88; опубл. 30.09.91, Бюл. № 36.

116. Шагиев Р. Г. Анализ гидравлической эффективности противотурбулентных присадок и внутритрубных отложений в процессе эксплуатации нефтепроводов / Р. Г. Шагиев, А. М. Тажигулов: Материалы научно-практич. конф. “Роль науки в развитии топливно-энергетического комплекса” в рамках 7 Всерос.энергет.форума, 13 Междунар. специал. выставки “Энергетика Урала 2007” и 5 Междунар. специал. выставки “Энергосбережение 2007”, Уфа, 24 окт. 2007. – с. 172-173.

117. А. с. 1100459 СССР, МКИ F 17D 1/14. Способ однотрубного сбора продукции нефтяных скважин и устройство для создания пристенного слоя газовой смазки / Г. Г. Корнилов, Ю. И. Толкачев, М. Н. Июшпе и др.//– № 3489684/25-08; заявл. 03.09.82; опубл. 30.06.84, Бюл. № 24.

118. А. с. 591655 СССР, МКИ F 17D 1/02. Способ транспортировки газа / Ч. С. Гусейнов, С. Я. Богданович, С. Н. Кирчанов и др.// – № 2016793/25-08; заявл. 19.04.74; опубл. 15.02.78, Бюл. № 5.

119. Заявка 2514104 Франция, МКИ F 17D 1/20, E 21B 43/34. Procédé et appareil pour la separation et l'écoulement séparé de gaz et de liquide dans un système d'écoulement / NAESS Erik B. (Франция); rep. par Bonnet-Thirion et G.Foldes.– № 813349; заявл. 02.10.81; опубл. 01.10.82. РЖ Изобретения ... Вып. 92. 1983, № 9. – С. 7.

120. А. с. 855335 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ транспортирования высоковязкой водонефтяной эмульсии / А. К. Розенцвайг, И. Х. Исмагилов, Ф. Г. Арзамасцев (СССР).– № 2722445/25-08; заявл. 05.02.79; опубл. 15.08.81, Бюл. № 30.

121. Кекалов А.Н. Измерение профилей скорости при пульсирующем течении нелинейно-вязкоупругих жидкостей в круглой трубе /А. Н. Кекалов, Е. С. Михайлова, В. И. Попов, Е. М. Хабахпашева// Теплообмен и трение в однофаз. потоках.–Новосибирск, 1988. – С. 76-91.

122. Miles Danny G (Jr). Longitudinal and transverse waves in a viscoelastic fluid / Miles Danny G (Jr), Le Nhat, Kivelson Danie // J. Chem. Phys. – 1989. – V. 90, № 10. – P. 5327-5332.

123. Khabakhpasheva E. M. Pulsating flow of viscoelastic fluids in tubes /E. M. Khabakhpasheva, V. I. Popov, A. N. Kekalov, E. S. Mikhailova// J. Non-Newton. Fluid Mech. – 1989. – V. 33, № 3. – P. 289-304.

124. Phan-Thien N. Pulsating flow of a plastic fluid / Phan-Thien N., Dudek J. // Nature. – 1982, V. 296, № 5860. – P. 843-844.

125. Заявка 57-27359 Япония, МКИ F 17D 1/20, F 16L 55/04. Устройство для уменьшения турбулентности в распределительных трубопроводах водяного насоса / Кубота тэкко К. К. (Япония). – №53-22389; Заявл. 27.02.78; Опубл. 10.06.82. РЖ Изобретения ... Вып. 92. 1983, №1. – С. 12.

126. Мукук К. В. Волновые процессы в нефтяных суспензиях / К. В. Мукук, З. Ш. Худайбергенова // Докл. АН УзССР. – 1988. – № 5. – С. 17-20.
127. Davies T. R. H. Large debris flows: a macro-viscous phenomenon / Davies T. R. H. // Acta mech. – 1986. – V. 63, № 1-4. – P. 161-178.
128. А. с. 1571360 СССР, МКИ F 17 D 1/20. Способ напорного транспорта жидких сред по двум или более линиям транспортного трубопровода и устройство для его осуществления / П. В. Давлианидзе, В. Д. Мачавариани (СССР). – №4343051/23-29; заявл. 15.12.87; опубл. 15.06.90, Бюл. № 22.
129. Dai Guang-qing. An investigation of flow characteristic of aerated drag reduction in tube / Dai Guang-qing, Yang Qing, Zhang Rong // J. Hydrodyn. B. – 2002. – Vol. 14, № 3. – P. 102-105.
130. А. с. 1413353 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ трубопроводного транспорта высокопарафинистой нефти / П. В. Михальков (СССР). – № 4094788/23-08; заявл. 22.07.86; опубл. 30.07.88, Бюл. № 28.
131. Kato Hiroharu Frictional drag reduction by injecting high-viscosity fluid /Kato Hiroharu, Fujii Yusaku, Yamaguchi Hajime, Miyanaga Masaru// Нихон дзосэн гаккай ромбунсю. = J. Soc. Nav. Archit. Jap. – 1990. – V. 168, DEC. – P. 39-50.
132. Кобец Г. Ф. Объяснение эффекта Томса анизотропией вязкости раствора / Г. Ф. Кобец // Прикладная механика и техническая физика. – 1969. – №1. – С. 107-111.
133. Sokolov M. Relaminarization of a turbulent boundary layer by severe wall suction through a porous slot / M. Sokolov, R. A. Antonia, Y. Zhu // 5th Eur. Turbulence Conf., Siena. July 5-8. – 1994: Abstr. – Siena. – 1994. – P. 201-202.
134. Заявка 3342421 ФРГ, МКИ F 15D 1/12, B 64 C 21/06. Verfahren zur stabilisierenden Beeinflussung abgelöster laminarer Grenzschichten / Lurz Werner (DE). – № 3342421; заявл. 24.11.83; опубл. 05.06.85, РЖ Изобретения стран мира, Вып. 89. – 1985. – № 12. – С. 20.
135. Заявка 2393964 Франция, МКИ F 15D 1/00, F 03B 11/04, F 04D 29/66, F 04B 11/00. Procédé pour prévention de phénomènes destructifs liés à la cavitation / Yves Lecoffre (France). – № 2393964; заявл. 08.06.77; опубл. 09.02.79, РЖ Изобретения стран мира, Вып. 86. – 1979. – № 6. – С. 12.
136. Ooizumi Hirofumi Control of turbulent separation by periodic suction and injection / Ooizumi Hirofumi, Obi Shinnosuke, Masuda Shigeaki // Nihon kikai gakkai ronbunshu. B. – Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B.-1993.- 59, № 557.- P. 123-128.
137. Lee Keun H. Application of reduced-order controller to turbulent flows for drag reduction /Lee Keun H., Cortelezzi Luca, Kim John, Speyer Jason// Phys. Fluids.-2001.- Vol. 13, № 5. – P. 1321-1300.
138. Xu Chun-Xiao Suboptimal control for drag reduction in turbulent pipe flow / Xu Chun-Xiao, Choi Jung-Il, Sung Hyung Jin // Fluid Dyn. Res. – 2002. – Vol. 30, № 4. – P. 217-231.

139. Bewley Thomas r. A “win-win” mechanism for lowdrag transients in controlled two-dimensional channel flow and its implications for sustained drag reduction / Bewley Thomas r., Aamo Ole Morten // *J. Fluid Mech.* – 2004. – Vol. 499. – P. 183-196.

140. Волчков Э. П. Влияние горения на тепломассообмен и трение в пограничном слое / Э. П. Волчков, Л. Н. Перепечко. // *Устойчивость течений гомог. и гетерог. жидкостей.* – 2001. – № 8. – С. 41-42.

141. Терехов В. В. Совместное влияние пористого вдува и горения на сопротивление трения в турбулентном пограничном слое / В. В. Терехов // *Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды 14 Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А. И. Леонтьева, Рыбинск.* – Т. 1. – М.: МЭИ. – 2003. – С. 321-324.

142. Roberts J. L. Artificial thickening of wind tunnel boundary layers via an array of cross-flow jets / J. L. Roberts, G. J. Walker // *Proc. [14 Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC), Perth, 2003]* // *Exp. Therm. and Fluid Sci.* – 2003. – Vol. 27, №5. – P. 583-588.

143. А. с. 1386763 СССР, МКИ F 15C 1/04. Способ преобразования электрического сигнала в пневматический или гидравлический / В. Я. Краснослободцев (СССР). – № 4038773/24-24; заявл. 20.03.86; опубл. 07.04.88, Бюл. № 13. – 3 с.

144. Cherniuk Volodymyr Decrease of hydraulic resistance of pipe lines by means of weakening of an intermolecular interaction in flows of liquids and gases / Volodymyr Cherniuk, Volodymyr Zhuk // *Zbornik prednášok “VII Vedecká konferencia s medzinárodnou účasťou”.* 13 sekcia: Košicko-L’vovsko-Rzeszowska. – Košice (Slovakia): Technická univerzita. – 2002. – S. 85-88.

145. Чернюк В. Пониження опору трубопроводів формуванням плинних систем з перепомповуваних середовищ / В. Чернюк // *Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація.* – № 460. – Львів: НУ ЛП. – 2002. – С. 188-197.

146. Заявка 2657416 Франция, МКИ F 17D 1/065, C 23F 11/10. Procède et dispositif pour le transport et le traitement d'un gaz naturel / [Larue Josepn, Collin Jean-Claude, Minkinen Ari, Rojey Alexandre] (Франция); Institut Francais du petrole. – № 9000757; заявл. 23.01.90; опубл. 26.07.91. РЖ Изобретения... Вып. 71. 1992, № 5. – С. 9.

147. Пат. 4246920 США, МКИ F 17D 1/17. Method of transporting of viscous hydrocarbons / Gilford G. McClaflyn (США); Conoco Inc. – № 918015; заявл. 22.06.78; опубл. 27.01.81; НКИ 137-13. – РЖ Изобр... Вып. 92. 1982, № 2. – С. 5.

148. Саркисов С. Д. Влияние добавок водорастворимых полимеров на вязкость эмульсий вода/масло / С. Д. Саркисов, Л. А. Файтельсон // *Мех. композит. матер.* – 1992. – № 1. – С. 96-104.

149. Пилипенко В. Н. Снижение гидродинамического сопротивления при течении эмульсий поверхностно-активных веществ / В. Н. Пилипенко, В. Н. Каращенко // Докл. АН СССР.– 1988.– Т. 301, № 4 – С. 817-821.

150. Седов Л. И. Снижение турбулентного сопротивления при течении суспензий и эмульсий / Л. И. Седов, В. Н. Пилипенко // Мех. неоднород. и турбулентн. потоков. – М., 1989.– С. 5-15.

151. Заявка 2308046 Франция, МКИ F 17D 1/16. Procède pour transporter des bruts cireux / Fred Heinz Poettmann (Франция); Marathon Oil Company. – № 568742; заявл. 16.04.75; опубл. 22.03.76. РЖ Изобретения... Вып. 38. 1976, № 24. – С. 25.

152. Пат. 4949743 США, МКИ F 17D 1/17, В 01J 13/00. Fluidization of heavy slurries / Henry T. Broom (США); NALCO Chemical Company. – № 132836; заявл. 14.12.87; опубл. 21.08.90; НКИ 137-13. – РЖ Изобретения... Вып. 71. 1991, № 11. – С. 9.

153. А. с. 1657844 СССР, МКИ F 17D 1/20. Устройство для перекачки высоко-вязких жидкостей / [Р. Х. Сандт, К. К. Цедрик, Н. И. Чинарьян, Н. Н. Кузнецова] (СССР). – № 4667505/29; заявл. 19.12.88; опубл. 23.06.91, Бюл. № 23.

154. Дембелова Т. С. Исследование реологических свойств жидкостей в зависимости от мощности акустического воздействия / Т. С. Дембелова, Е.Р. Очирова, Б.Б. Бадмаев/ Тр. 7 Семинара СНГ “Акустика неоднородных сред”, Новосибирск, 2002 // Динам. сплощ. среды. – 2002. – № 121. – С. 81-84.

155. Васкас М. Уменьшение падения давления в потоке, текущем в трубе, путём приложения к трубе потенциала / М. Васкас, В. Дауйотис, К. Б. Волден и др.// Докл. 9 Международн. конф. “Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах”. (Уфа, 14-18 авг., 2006) // Электрохимия. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 469-656.

156. А. с. 785562 СССР, МКИ F 15D 1/02, F 17L 55/00. Устройство для снижения трения в трубопроводах и шлангах / В. В. Бурлов, Е. С. Беляев, В. А. Погорельский (СССР). – № 2728800/25-06; заявл. 23.02.79; опубл. 07.12.80, Бюл. № 45. – 2 с.

157. Миронов М.А. Акустическая технология снижения вязкости нефтепродуктов в трубопроводах при низких температурах /М. А. Миронов, В. А. Пирогов, Б. П. Туманян, С. Н. Челинцев// Хим. и нефтегаз. машиностр. – 2004.– № 1. – С. 13-17.

158. Белов И. А. Экспериментальное исследование возможности затягивания ламинарно-турбулентного перехода при акустическом воздействии / И. А. Белов, В. М. Литвинов // Пробл. мех. и некотор. соврем. аспекты науки / РАН. Отд. мех.-мат. методов и технол. и экон. разраб. при Призидиуме РАН. – М., 1993. – С. 91-99.

159. А.с. 932095 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ снижения гидравлического сопротивления трубопровода /Н. И. Репин, А. И. Дьячук,

О. М. Юсупов и др.// – № 2955778/25-08; заявл. 10.07.80; опубл. 30.05.82, Бюл. № 20.

160. А.с.1643864 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ снижения гидравлического сопротивления трубопровода / [В. П. Маслов, Ф. Н. Маричев, Р. Г. Абашев, Н. И. Матвеев] (СССР).–№ 4615596/29; Заявл. 09.09.88; Опубл. 23.04.91, Бюл. № 15.

161. А.с. 1373970 СССР, МКИ F 17D 1/16, E 21B 43/00. Устройство для снижения вязкости нефти / И. И. Лаптев, Г. М. Багаутдинов (СССР). – № 4089078/23-08; Заявл. 26.03.86; Опубл. 15.02.88, Бюл. № 6.

162. Корнилов В. И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) / В. И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 2. – С. 183-208.

163. Козлов Л. П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування / Л. П. Козлов // Вісн. АН УРСР. – 1987. – № 1. – С. 23-33.

164. Ступин А.Б. Применение гидродинамически-активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А. Б. Ступин, П. В. Асланов, А. П. Симоненко и др. // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74-81.

165. Макаров С. П. Опыт применения противотурбулентной присадки на нефтепродуктопроводах ОАО “АК “Транснефтепродукт” / С. П. Макаров, С. М. Фокин, И. И. Ерошкина и др.// Трансп. и хранение нефтепродуктов.– 2000.– № 4.– С. 14-17.

166. Прохоров А. Д. Гидравлическая эффективность применения противотурбулентной присадки при транспортировке дизельного топлива / А. Д. Прохоров, С. Н. Челинцев, А. В. Черников и др. // Трансп. и хранение нефтепродуктов.– 2000.– № 3.– С. 8-9.

167. Motier J. F. Polymeric drag reduction in petroleum products /Motier J. F., Prilutski D. J., Shanti In Z. J., Kostelnik R. J.// Drag Reduct. 3rd Int. Conf. – Bristol.– 1984.– P. F3/1-F3/23.

168. Козловская И.А. Натурные исследования гидравлических сопротивлений напорных оросительных трубопроводов при введении в воду полимерных добавок / И. А. Козловская // Гидравлика и гидротехника. – 1981.– № 32. – С. 103-106.

169. Pollert J. Today and future possibilities of industrial applications of drag reduction / J. Pollert // Proc. Fields. Symp. “ Influence Polym. Addit. Velocity and Temp. Univ.-GH, Essen, 1984”. – Berlin. – 1985.– P. 371-395.

170. Перепелица Б.В. Статические характеристики пульсаций температуры в турбулентном потоке воды с добавкой полимера / Б.В. Перепелица // Труды Междунар. форума “Тепломассообмен-ММФ”.– Минск.– 1988.– Секц. 6. Тепломассообмен в реол. Системах. – С. 7-9.

171. Григорян С.С. Биомеханические аспекты действия снижающих гидродинамическое сопротивление полимеров / С.С. Григорян, И.А.

Соколова, А.А. Шахназаров, В.В. Смирнов// Проблемы современной механики. К юбилею Л. И. Седова.– М.: Ин-т мех. МГУ, 1998.– С. 47-51.

172. Гафарова М.Э. Гемореологическое влияние полимеров, снижающих гидродинамическое сопротивление /М.Э. Гафарова, С.Ю. Семёнова, И.А. Соколова, А.А. Шахназаров// Ломоносовские чтения: тезисы докладов научн. конференции. Секция механики. Л-75. 15-25 апреля 2007, Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова. – 2007. – М.: МГУ. – с. 54-55.

173. Воскобойник В.А. Снижение гидродинамических шумов растворами высокомолекулярных полимеров / В.А. Воскобойник, В.Т. Гринченко, А. П. Макаренко // Акустичний вісник. – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 33-42.

174. Савицкая М. Н. Полиакриламид / М. Н. Савицкая, Ю. Д. Холодова// – К.: Техника, 1969. – 187 с.

175. Абрамов Н. Н. Водоснабжение: Учебник для вузов / Н. Н. Абрамов//– М.: Стройиздат, 1982. – 440 с.

176. Semenov V. N. Towards the influence of flow polymer additives and surface compliance on wall turbulence / V. N. Semenov, V. M. Kulik, V. A. Lopyrev etc.// Труды “5 Нац. конгр. по теор. и прикл. мех., Варна, 1985: 14 Науч.-методол. семин. по гидродинам. судна. Современ. пробл. гидро- и аэродинам. судна” Т. 2. – Варна. – 1985. – Р. 371-376.

177. Gagan S. Some studies on non-newtonian flow and heat transfer in wavy tubes / S. Gagan, K. V. Iyer, A. Mukherjea etc. // Proc. 8th Nat. Heat and Mass Transfer Conf., Visakhapathan.– New Delhi. – 1985. – Р. 285-289.

178. Arsalane D. Approximations spectrale et experimentale d'écoulements inélastiques non permanents en conduits souples / D. Arsalane, D. Bellet // J. mèc. thèor. et appl.– 1986.– V. 5, № 6.– Р. 941-955.

179. Малюга А.Г. Снижение турбулентного трения при течении аэрированных пузырьками воздуха полимерных растворов /А. Г. Малюга, В. И. Микута, О. И. Стояновский, С. П. Кравченко// Пристен. и свобод. турбулент. течения. – Новосибирск.– 1988.– С. 121-130.

180. Урьев Н. Б. О двух типах кривых течения структурированных дисперсных систем / Н. Б. Урьев, С. В. Чой // Коллонд. ж. – 1993. – Т.55, № 3 – С. 183-191.

181. А.с. 909384 СССР, МКИ F 15D 1/06. Способ управления турбулентным пограничным слоем / В. Ф. Потемкин, Г. А. Дрейцер (СССР). – № 2906801/25-06; заявл. 14.03.80; опубл. 28.02.82, Бюл. № 8.

182. А.с. 393535 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ предотвращения образования парафинистых отложений в трубопроводах / А. И. Арутюнов, И. Н. Порайко, А. М. Гнатюк (СССР). – № 1618209/23-4; Заявлено 28.12.70; Опубл. 10.08.73, Бюл. № 33.

183. Физическая гидродинамика: Сб. науч. тр. / Отв. ред. И. Л. Повх. – Донецк: ДонГУ, 1990. – 171 с.

184. Заявка 4018303 ФРГ, МКИ F 17D 1/17. Verfahren zur Reibungsminderung in strömenden Medien / Köhls Ingrid, Pollock Norbert, Haenschke Lothar [und andere] (ФРГ); VEB Wärmeanlagenbau "DSF". – № F 15D/329436; Заявлено 09.06.89; Опубл. 13.12.90. – РЖ Изобретения... Вып. 71. 1991, № 12. – С. 4.

185. А.с. 1693315 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ снижения гидродинамического сопротивления потока жидкости / И. И. Лиштван, Ю. А. Бухман, И. В. Косаревич, А. Ц. Матевосян (СССР). – № 4611791/05; заявл. 01.12.88; опубл. 23.11.91, Бюл. № 43.

186. Политехнический словарь / Под общ. ред. А. Ю. Ишлинского – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с.

187. Химический энциклопедический словарь / Гл. ред. Кнунянц И.Л. // – М.: Сов. энциклопедия, 1983, – 792 с.

188. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии / С.С. Воюцкий//– М.: Химия, 1976. – 512 с.

189. А. с. 436962 СССР, МКИ F 17D 1/10, В 36В 1/34. Способ уменьшения гидродинамического сопротивления при внутренней и внешней задаче течения / И. Т. Эльперин (СССР). – № 575255/27-11 и № 1325878/27-11; заявл. 06.12.54; опубл. 25.07.74, Бюл. № 27.

190. Повх И. Л. Исследование критических концентраций мицеллообразования водных растворов поверхностно-активных веществ /И. Л. Повх, Р. В. Кучер, И. А. Шевчук и др.// Журн. прикл. хим. – 1978. – Т. 51, № 5. – С. 1045-1048.

191. Снижение турбулентного сопротивления трения добавками поверхностно-активных веществ: Отчет о НИР / МГУ им. М. В. Ломоносова. Ин-т механики; № ГР б/н; Инв. № 2142. – М., 1978. – 37 с.

192. А.с. 1055940 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ перекачки многофазной жидкости по трубопроводу / А. И. Гужов, В. Ф. Медведев, Л. П. Медведева (СССР). – № 3248223/25-08; заявл. 18.02.81; опубл. 23.11.83, Бюл. № 43.

193. А.с. 838274 СССР, МКИ F 17D 1/14. Способ транспортировки и хранения жидкого топлива / К. В. Зотова, Д. Н. Левченко, Н. М. Николаева (СССР). – № 2785795/25-08; заявл. 27.06.79; опубл. 15.06.81, Бюл. № 22.

194. А.с. 1550262 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ транспортировки по трубопроводу вязких нефтей и нефтепродуктов /Е.И. Жирнов, В.Ф. Алексеров, А. И. Тихонов, Т. М. Гасанов// – № 4433606/23-29; заявл. 25.04.88; опубл. 15.03.90, Бюл. № 10.

195. А.с. 804994 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ совместного транспортирования природного газа и нефти / Л. Ф. Бондаренко, З. Р. Горбис, А. И. Ильченко и др. (СССР). – № 2652614/25-08; заявл. 28.07.78; опубл. 15.02.81, Бюл. № 6.

196. А.с. 1027467 СССР, МКИ F 17D 1/20. Способ трубопроводного транспорта жидкости и система для его осуществления / Л. Ф. Бондаренко, А.

И. Ильченко, С. И. Красноокий и др. (СССР). – № 3007731/25-08; заявл. 14.11.80; опубл. 07.07.83, Бюл. № 25.

197. Пилипенко В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Мех. жидкости и газа. – 1980. – Т. 15. – С. 156-257.

198. Проскуряков П.А. О гидравлических сопротивлениях при движении древесновоодной пульпы по трубопроводам / П. А. Проскуряков // Труды науч.-техн. конф. Лесоинж. фак. Ленингр. лесотехн. акад. – 1971. – С. 31-34.

199. Tichonov J. A. Rheologische und hydrodynamische Verhältnisse beim Dispergieren von Faserstoffsuspensionen / J. A. Tichonov, O. A. Terentjev, W. S. Kurov // Zellst. und Pap. – 1991. – 40, № 2. – S. 67-71.

200. Lin Jianzhong Stability in channel flow with fiber suspensions / Lin Jianzhong, You Zhenjiang // Progr. Nat. Sci. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 95-99.

201. Malhotra J. P. Shear stability studies on polymer-polymer and polymer-fibre mixtures / Malhotra J. P., Chaturvedi P. N., Singh R. P. // Rheol. Acta. – 1987. – V. 26, № 1. – P. 31-39.

202. Singh R. P. Characteristics of some polymer-polymer, polymer-fibre combinations and grafted polymers as drag reducing agents and their industrial applications / Singh R. P., Chang P., Reddy G. V., etc. // Drag Reduct. 3rd Int. Conf., Bristol. – Bristol. – 1984. – P. D4/1-D4/5.

203. А.с. 654828 СССР, МКИ F 17D 1/20. Способ уменьшения гидродинамического сопротивления при внутренней и внешней задаче течения / И. Т. Эльперин // (СССР). – № 2506886/25-08; Заявлено 05.07.77; Опубл. 30.03.79, Бюл. № 12.

204. Никитин И. К. Сложные турбулентные течения и процессы теплопереноса / И. К. Никитин // – К.: Наук. думка, 1980. – 240 с.

205. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // – М.: Наука, 1988. – 736 с.

206. Монин А. С. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности: В 2 ч. Ч. 1 / А. С. Монин, А. М. Яглом // – М.: Наука, 1965. – 640 с.

207. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский // – М.: Наука, 1978. – 736 с.

208. Седов Л. И. О расчетах турбулентных пограничных слоев с малыми добавками полимеров / Л. И. Седов, Н. Г. Васецкая, В. А. Иосилевич // Турбулентные течения. – М.: Наука. – 1974. – С. 205-220.

209. Кобец Г. Ф. О физическом обосновании механизма снижения сопротивления полимерными добавками / Г. Ф. Кобец // Влияние полимерных добавок и упругости поверхности на пристенную турбулентность. – Новосибирск. – 1978. – С. 24-44.

210. Fabula A. G. Some interpretation of the Tims effect. Modern developments in the mechanics of continua / A. G. Fabula, J. L. Lumley, W. Taylor // Academic Press. – 1966. – P. 145-166.

211. Liberman M. W. Shear-induced structure formation in solutions of drag reducing polymers / M. W. Liberman, E.J. Pollauf, A. J. J. McHugh // Non-Newton. Fluid Mech. – 2003. – Vol. 113, № 2-3. – P. 193-208.

212. Погребняк В. Г. Растворы полимеров в условиях пристеночной турбулентности и механизм снижения гидродинамического сопротивления / В. Г. Погребняк, А. А. Писаренко // Прикладна гідромеханіка.– 2000.– Т.2 (74), № 2.– С. 83-95.

213. Калашников В. Н. Вязкоупругие свойства разбавленных растворов высокомолекулярных полимеров: Измерения естественного времени / Калашников В. Н., Аскарлов А. Н.//– М.: ИПМ АН СССР, 1968. – 53 с. (Препр. / АН СССР. Ин-т проблем механики; 278-86).

214. Повх И. Л. О влиянии упругости растворов полимеров на снижение сопротивления / И. Л. Повх, А. Б. Ступин // Журн. прикладной механики и технической физики, 1972. – № 1. – С. 63-68.

215. Кобец Г. Ф. Расчет сопротивления при турбулентном течении слабоконцентрированных растворов полимеров / Кобец Г. Ф.// – Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1984.– 35 с. (Препр. / СО АН СССР. Ин-т теплофизики; 116-84).

216. Кутателадзе С. С. Экспериментальное исследование структуры пристенных турбулентных течений /С.С. Кутателадзе, Б.П. Миронов, В.Е. Накоряков, Е.М. Хабахпашева// – Новосибирск: Наука, 1975. – 166 с.

217. Иванюта Ю. Ф. Экспериментальное исследование турбулентного течения в трубе слабых растворов полимеров / Ю. Ф Иванюта, Л. А. Чекалова // Инж.-физ. журн. – 1970. – Т. 18, № 6. – С. 1085-1093.

218. Virk P. S. Drag reduction fundamentals / P. S. Virk // AIChE J. – 1975. – V. 21, № 4. – P. 625-656.

219. Курганов А. М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров// – Л.: Стройиздат, 1978. – 424 с.

220. Чугаев Р. Р. Гидравлика: Учебник / Р. Р. Чугаев// – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

221. Пилипенко В.Н. Трение и теплообмен при турбулентном течении слабых растворов в гладких трубах/В.Н.Пилипенко //Изв. АН СССР, МЖГ, – 1975, – №5, – С. 225-230.

222. Иванюта Ю.Ф. Турбулентные трения растворов полиокса в трубе с большой шероховатостью /Ю.Ф.Иванюта, Л.А.Чекалова //ИФЖ,-1976,- Т.31,-№2.

223. Неронова И.А. Деструкция полиэтилена и её связь со снижением сопротивления трения в турбулентном

потоке/И.А.Неронова//Сб. «Механика турбулентных потоков, – М.: Наука, – 1980, с. 364-368.

224. Повх И.Л. Связь между молекулярным строением полиэтиленоксида и эффектом снижения гидродинамического сопротивления /И.Л.Повх, В.Г.Погребняк, А.И.Торяник //Инж.-физ.журн., – 1979, – Т.37, – №4, – С. 581-588.

225. Иванюта Ю.Ф. Экспериментальное исследование турбулентного течения слабых растворов полимеров в трубах различных диаметров /Ю.Ф.Иванюта, Л.А.Чекалова //-ИФЖ, – 1971,- Т.21, – №1.

226. Николаев А.Ф. Водорастворимые полимеры / А.Ф.Николаев, Г.И.Охрименко. //-Л.: Химия, 1979, – 145 с.

227. Торяник А.И. Молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления добавками полимеров / А.И.Торяник // – Донецк: ДонГУ, в сб.Физическая гидродинамика, 1990, – С. 26-32.

228. Повх И.Л. Влияние водородного показателя среды рН на снижение сопротивления слабых растворов полимеров / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, С.Н. Максютенко, А.П.Симоненко// Респ.сборник Бионика.- К.:Наукова думка. – 1975.-№9.-С.74-78.

229. Бектуров Е.А. Синтетические водорастворимые полимеры в растворах/ Е.А. Бектуров, З.Х. Бакацова//- Алма-Ата: Наука.- 1981.- 248 с.

230. Ахмедов К.С. Водорастворимые полимеры и их взаимодействие с дисперсными системами / К.С. Ахмедов //- Ташкент: ФАН.- 1969.- 252 с.

231. Brandrup J. Polymer Handbook/ J. Brandrup, E.N. Immergut //- N.-Y.-London: J. Wiley and Sons Inc.- 1975.-1396 p.

232. Ed. Davidson R.L. Water - soluble resins/ Ed. Davidson R.L., M. Sitting // N.-Y.: Reinhold.- 1968.- 209 p.

233. Роговин З.А. Химия целлюлозы / З.А. Роговин//- М.: Химия.- 1972.- 520 с.

234. Вейцер Ю.И. Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод/ Ю.И. Вейцер, Д.М. Минц //- М.: Стройиздат.- 1984.- 201с.

235. Запольский А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды/ А.К. Запольский, А.А. Баран //- Л.: Химия.- 1987.- 208 с.

236. Фурукава Дж. Полимеризация альдегидов и окисей/ Дж. Фурукава, Т. Саегуса//- М.: Мир.- 1965.- 480 с.

237. Трофимович Е.М. Гигиена и санитария/ Е.М. Трофимович, Е.А. Струевич, П.А. Колесников и др. //- 1976, № 7, с. 23.

238. Шинода К. Коллоидные поверхностно-активные вещества. Физико-химические свойства/К. Шинода, Т. Накагава, В. Тамамуси, Т. Исемура//М.: Мир.1966, 320 с.

239. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: Справочник / А.А. Абрамзон, В.В. Бочаров, Г.М. Гаевой// Л.: Химия.- 1979.- 376 с.

240. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и

применение/ А.А. Абрамзон - Л.Химия, 1981. - 304 с.

241. Пушкарев В.В. Физико-химические особенности очистки сточных вод от ПАВ/В.В. Пушкарев, Д.И. Трофимов// - М.: "Химия".- 1975.- С. 11-33.

242. Неволин Ф.В. Химия и технология синтетических моющих средств/ Ф.В. Неволин// - М.: "Пищевая промышленность".- 1964.- 523 с.

243. Штюпель Г. Синтетические моющие и очищающие средства/ Г. Штюпель// - М.: Госхимиздат.- 1960.- 672 с.

244. Шварц Д. Поверхностно-активные вещества/ Д. Шварц, Д. Перри // Пер. с нем. Под ред. Таубмана А.Б..- М.: Издательство.- 1954.- 555 с.

245. Симоненко А.П. Способы определения концентрации гидродинамически-активных полимеров в однородных растворах и устройства для их реализации / А.П. Симоненко, Н.А. Дмитренко, А.Ю. Собко, С.А. Фоменко// Вести АДИ. ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет».- Горловка – 2017, № 2 (21).- С. 50-56

246. Гнатив Р. М. Влияние полимерных добавок на местные потери напора в трубопроводах / Р. М Гнатив, В. В. Чернюк // Вестн. Львов. политехн. ин-та. Теплоэнергетические системы и устройства. – Львов: Вища школа. Львов. ун-т.– 1989. – № 237. – С. 17-20.

247. Тютчев И. И. Особенности течения неньютоновских жидкостей в области внезапного сужения канала / И. И. Тютчев, Н. Т. Романенко, О. М. Яхно // Хим. машиностроение. Респ. межвед. научно-техн. сб. – 1975. – Вып. 22.– С. 110-116.

248. Чернюк В. В. О влиянии добавок полиакрамида на сопротивление внезапных сужений и расширений труб / В. В. Чернюк, Б. Ф. Левицкий // Вестн. Львов политехн. ин-та, Теплоэлектроэнергетические и электромеханические системы № 184.– Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те. – 1984. – С. 123-126.

249. Tachibana Motoyoshi. On the flow in a circular section tube and the loss due too sudden enlargement. Effect of drag-reducing additives / Tachibana Motoyoshi, Kita Masakazu // Bull. JSME. – 1978. – V. 21, № 159. – P. 1341-1348.

250. Dohmann J. The structure of the drag reduced turbulent flow over a backward facing step – an experimental study / Dohmann J. // Notes Numer. Fluid Mech. – 1992. – № 40. – P. 66-72.

251. Ступин А.Б. Переходной режим при течении растворов поверхностно-активных веществ / А.Б. Ступин, В.М. Максимцов// Тезисы докладов вузовс. конф. проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. работы. Математика, физика.- Донецк: ДонГУ.- 1995. - С. 11 - 12.

252. Ступин А.Б. Эффект масштаба течений для растворов поверхностно-активных веществ / А.Б. Ступин, В.М. Максимцов // Тезисы докладов вузовс. конф. проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. работы. Математика, физика.- Донецк: ДонГУ, 1995. - С. 13-14.

253. Ступин А.Б. Максимальное снижение сопротивления трения и

профиля скорости при течении растворов поверхностно-активных веществ / А.Б. Ступин, П.В. Асланов, В.М. Максимцов // Тези докл. вузовс. конф. проф.-викладацького складу за підсумками наук.-дослідної роботи. Математика, фізика, екологія.- Донецьк: ДонДУ.-1997. - С. 108 - 110.

254. Stupin A.B. In the liquid streams caused by surface active agent (SAA) additives / A.B. Stupin // Book of abstracts 9th European Drag Reduction Meeting.- Ravello: Universita di Napoly, Italy.- 1995. - P. 58.

255. Ступин А.Б. Коэффициенты сопротивления трения и профили скорости при течении растворов поверхностно-активных веществ / А.Б. Ступин, П.В. Асланов, В.М. Максимцов // В сб.: Теоретическая и прикладная механика.- Харьков: Основа.- 1999. Вып. 29. - С. 163 - 168.

256. Ступин А.Б. Исследование турбулентных течений растворов полимера и поверхностно-активного вещества / А.Б. Ступин, П.В. Асланов, В.М. Максимцов // В сб.: Теоретическая и прикладная механика.- Харьков: Основа.- 1998. Вып. 28. - С. 142 - 146.

257. Симоненко А. П. Основные закономерности снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения в растворах мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / А. П. Симоненко, Н. А. Дмитренко, П. В. Асланов // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: материалы I Междунар. науч. конф. (Донецк, 16-18 мая 2016 г.). – Ростов-на-Дону, 2016. – Т. 1 : Физ.-мат., техн. науки и экология / под общ. ред. С. В. Беспаловой. – С. 191-194.

258. Ступин А.Б. Эффект снижения турбулентного трения жидкостей добавками полимеров и поверхностно-активных веществ (ПАВ) /А.Б. Ступин/ В кн. Научная школа Ивана Лукича Повха (к 100-летию со дня рождения) / Под общ. ред. Ступина А.Б. – Донецк: ДонНУ, 2009. – 317 с.

259. Симоненко А.П. Снижение турбулентного трения в водных растворах смесей гидродинамически-активных полимеров и поверхностно-активных веществ /А.П. Симоненко, П.В. Асланов, Т.К. Гучмазова, Н.А. Дмитренко// Вестник ДонНУ. Сер. Г: Техн. науки. – 2018. – № 4. – С. 79-93

260. Симоненко А. П. Турбулентное течение водных растворов мицеллообразующих ПАВ в зазоре между коаксиальными цилиндрами / А. П. Симоненко // Инж.-физ. журнал. – 1980. – Т. XXXVIII, № 2. – С. 231-234.

261. Повх И.Л. Снижение турбулентного трения в водных растворах смесей полимеров и поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх и др.// Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т. 54, № 5. – С. 759-764.

262. Повх И.Л. Снижение турбулентного трения в растворах смеси мицеллообразующее ПАВ – полимер // И.Л. Повх, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, С.И. Шапошник// Деп. в ВИНТИ 27.02.1979, № 717-79 Деп.

263. А.с. СССР 777338, М. Кл³ F17 D1/02 Добавка для снижения гидродинамического сопротивления теплоносителя /И.Л. Повх, Н.П. Коваленко, А.И. Сердюк, В.Г. Львов, А.А. Зайка, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко//– № 2672372/25-08; заявл. 20.09.1979; оп. 07.11.1980, Бюл. № 41.

264. А.с. 798157, М. Кл 3 С09 К5/00 F 25В1/00 Хладоноситель / И. Л. Повх и др.// – № 2728478/23-06 ; заявл. 19.02.79 ; опубл. 23.01.81, Бюл. № 3.
265. Симоненко А.П. Перспективы применения эффекта Томса для повышения эффективности работы гидравлических систем гидротранспорта сыпучих материалов, канализации и отведения сточных вод / Симоненко А.П., Артемова И.А. // Вестник ДонНУ. Серия Г: Техн. науки. – 2018. – № 4. – С. 94-111
266. Жук В.М. Проблеми використання гідродинамічно-активних добавок для збільшення пропускної здатності каналізаційних колекторів /В.М. Жук, В. Орел// ІУ naukowa Konfer. Rzeszowsko-Lwowska, Problemy budownictwa i inżynierii Hrodowiska, Cz.II.- Pzeszyw.- 1995.- P. 241-246.
267. Жук В.М. Збільшення пропускної здатності каналізаційних колекторів в екстремальних умовах введенням полімерних додатків /В.М. Жук // В зб. наук. праць "Захист довкілля від техногенного впливу", № 1(2), Кременчуг.- 1998.- С. 122-126.
268. Клюкин И.И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах / И.И. Клюкин// - Л.: Судостроение.- 1971.- 416 с.
269. Ступин А.Б. Применение гидродинамически-активных добавок для снижения гидравлических потерь при подаче гипсовых растворов по трубопроводу / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, С.И. Степанов и др. // В сб. тезисов докл. вузов. научн. конференции. Естественные дисциплины.- Донецк: ДонГУ.-1993.- С. 39-40.
270. Комплекс "Темп-500", Техническое описание и инструкция по эксплуатации.- МУП СССР, ВНПО "Респиратор".- Донецк.- 1979.- 97 с.
271. Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности : монография / А. Б. Ступин и др.// под общ. ред. А. Б. Ступина, - Донецкий нац. ун-т. – Донецк : ДонНУ, 2010. – 503 с.
272. Симоненко А.П. Применение микродобавок полиэтиленоксида для улучшения транспортировки гипсовых растворов по трубопроводам / А.П. Симоненко, А.Б. Ступин, А.Ю. Собко и др. // В сб. трудов научно-практической конф. "Пути развития горноспасательного дела". Дополн. Выпуск.- Донецк: НИИ ГД.- 1997.- С. 4-6.
273. Симоненко А.П. Перспективы практического применения гидродинамически-активных композиций для полимерной локализации токсикантов в литосфере /Симоненко А.П., Артемова И.А.// Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 76-91
274. Погребняк В. Г. Физико-химические основы полимерной локализации токсикантов в литосфере / В. Г. Погребняк, А. А. Шубин. – Донецк : ДонГУЭТ, 2002. – 219 с.
275. Ступин А.Б. Современные пути улучшения экологической обстановки на крупных животноводческих комплексах / А.Б. Ступин, Г.Н. Молодан, В.В. Кафтанов, А.П. Симоненко// Тезисы докладов междунар. симпозиума "Стратегия формирования экологической безопасности

Донбасса", (Донецк, 13-15 сентября 1993).- Донецк.- 1993.- С.101-102.

276. Симоненко А.П. Оценка риска при загрязнении атмосферного воздуха аммиаком на свиноводческом комплексе/А.П.Симоненко, А.Ю.Собко//Труды первого междунар. научно-практ. семинара «Повховские научные чтения». – Донецк: ДонНУ, 2010, – С.153-156.

277. Симоненко А.П. Применение водорастворимых полимерных композиций для улучшения микроклимата на животноводческих комплексах / А.П. Симоненко, А.Ю. Собко // В зб.: Інженерні системи та техногенна безпека у будівництві. Вісник ДонДАБА (Донбаська державна академія будівництва і архітектури). – 2001, №2. – С.48-51.

278. Ступін О.Б. Патент України № 67759 МПК (2012.01) А01С 3/00 Композиція для обробки гною / О.Б.Ступін, О.П.Симоненко, О.І.Сердюк, О.Ю.Собко. – № u201107621; Заявл. 16.06.2011; Опубл. 122.03.2012, Бюл. №5.

279. Кузнецов А.Ф. Гигиена сельскохозяйственных животных/ А.Ф. Кузнецов, М.В. Демчук, А.И. Карелин и др.// - М.: Агропромиздат.- 1991.- Т. 1.- 399 с., Т. 2. - 403 с.

280. Вашкулат Н.П. Гигиена животноводческих комплексов и охрана окружающей среды / Н.П. Вашкулат, Е.И. Гончарук, Я.И. Костовецкий// Киев: Изд-во "Здоров'я".- 1985. - 280 с.

281. Симоненко А.П. Совершенствование технологии реагентной очистки сточных вод от твердых примесей /А.П. Симоненко, А.Ю. Собко, И.А. Артемова// Вест. ДонНУ. Сер. Г: Техн. науки. – 2019. – № 1. – С. 56-68

282. Дремов В.В. Увеличение производительности камер с волосяными ершами и аэрационными трубами для очистки сточных вод / В.В. Дремов, Ф.В Недопекин, Н.И. Куликов, И.А. Артемова // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2017. – №2(21). – С. 57-70

283. Симоненко А.П. Перспективы применения водорастворимых полимерных композиций для решения экологических проблем объектов строительства и городского хозяйства / Симоненко А.П., Недопекин Ф.В., Артемова И.А. // Материалы III Междунар. науч. кон-ции "Донецкие чтения – 2018". Т. 1 Физ-мат. и техн. науки ГОУ ВПО «ДонНУ».- г. Донецк – 2018 – С. 48-50с.

284. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе// – Москва : Атомиздат, 1979. – 416 с.

285. Гинзбург И. П. Теория сопротивления и теплопередачи / И. П. Гинзбург// – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1970. – 375 с.

286. Ковалевский В. Ф Теплообменные устройства и тепловые расчеты гидропривода горных машин / В. Ф. Ковалевский//– Москва : Недра, 1972. – 224 с.

287. Повх И.Л. Турбулентное течение и теплообмен жидкости с анизотропной вязкостью /И.Л. Повх, А.Б. Ступин// В сб.: Теплообмен- VI. - Минск: ИТМО АН БССР.- 1980.-Т. 6, Ч. 2.- С. 95 -103

288. Повх И.Л. Турбулентный теплообмен в слабых растворах

полимеров и поверхностно-активных веществ / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, С.Н. Максютенко и др. // В сб.: Тепломассообмен-V.- Минск: ИТМО АН БССР.- 1976.-Т. 7.- С. 284-292.

289. Пилипенко В. Н. Механизм снижения сопротивления и тепломассопереноса в турбулентных потоках с добавками различной природы / В. Н. Пилипенко, А. Г. Михайлу // Тепломассообмен – VI : сборник. – Минск, 1980. – Т. VI, ч. 2. – С. 89-94.

290. Повх И. Л. Турбулентный теплообмен при течении слабых растворов полимеров около твердой стенки / И. Л. Повх, А. Б. Ступин// Пристенное турбулентное течение : сборник. – Новосибирск, 1975. – Ч. 2. – С. 224-231.

291. Михайлу А. Г. Особенности влияния шероховатости и снижающих сопротивление добавок на турбулентный теплообмен / А. Г. Михайлу, В. Н. Пилипенко // Механика турбулентных потоков : сб. науч. тр. – Москва, 1980. – С. 318-330.

292. Хабахпашева Е. М. Турбулентный теплообмен в слабых растворах полимеров / Е. М. Хабахпашева, Б. Н. Перепелица // Тепло- и массоперенос : сборник. – Минск, 1972. – Т. 3. – С. 387-395.

293. Пилипенко В. Н. Трение и теплообмен при турбулентном течении слабых полимерных растворов в гладких трубах / В. Н. Пилипенко // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1975. – № 5. – С. 53-59.

294. Хабахпашева Е. М. Конвективный теплообмен в реологических средах / Е. М. Хабахпашева // Реодинамика и тепломассообмен : сборник. – Новосибирск, 1979. – С. 5-46.

295. Хабахпашева Е. М. Течение и теплообмен водных растворов высокополимеров : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е. М. Хабахпашева ; ИТФ СО АН СССР. – Новосибирск, 1971. – 29 с.

296. Симоненко А.П. Сопротивление трения и теплообмен в турбулентных потоках водных растворов гидродинамически-активных полимеров и поверхностно-активных веществ /А.П. Симоненко, П.В. Асланов, Т.К. Гучмазова, Н.А. Дмитренко// Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 56-67

297. Иоселевич В. А. Логарифмический профиль скорости при течении слабого полимерного раствора у шероховатой стенки / В. А. Иоселевич, В. Н. Пилипенко // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 213, № 6. – С. 1266-1269.

298. Симоненко А. П. Тепловой режим работы шахтной установки кондиционирования воздуха при использовании хладоносителей со сниженным гидродинамическим сопротивлением трения / А. П. Симоненко, П. В. Асланов, П. К. Костенко // Повховские научные чтения : сб. тр. II междунар. науч.-практ. семинара / под общ. ред. Ступина А. Б. – Донецк, 2012. – С. 64-70.

Приложения

Приложение А. Водорастворимые полимеры для снижения гидродинамического сопротивления

Принятые обозначения: ИВС - Институт высокомолекулярных соединений РАН (г. С.-Петербург, Россия), НИФХИ - научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова (г. Москва, Россия), НПО - научно-производственное объединение "Карболит" (г. Новосибирск, Россия), UC - Union Carbide; АСВ - Allied Colloids Branford; DC - Dow Chemical; W - Western; В- Burtonite; НАР - Hathaway Allied Products; RH - Rohm. Hass; BFG - B.F. Goodrich; SC - Sigma Chemical; MCH - Miles Chemical; M - Meer; NSRI - Norwegian Seaweed Research Institute; MC - Marine Colloids; CFS - Chemise Fabric Stockhausen; Z - W.E. Zimmite Inc.; K - Kelco; BDH - BDH Chemicals; SH - Stein Hall; C - Caldon; NC - Nalco Chemical; H - Hercules; Яп. - Япония; ФРГ - Федеративная Республика Германия; τ_w , н/м² - напряжение трения на стенке; t, °C – температура; Re - число Рейнольдса; $\Delta\lambda/\lambda_{max}$, % - максимальная величина эффекта снижения сопротивления; ЛО - лабораторный образец; в.в. - водопроводная вода; д.в. - дистиллированная вода, р-р - раствор; ац.-ацетон; ГС - гуаровая смола; ПАК - полиакриловая кислота; ПАА - полиакриламид, ГПАА - гидролизованый полиакриламид, КПАА - катионный полиакриламид; РПАА - разветвленный полиакриламид ПЭО - полиэтиленоксид,).

№ п/п	Полимер и его обозначение	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление			
			Растворитель	Re, 10 ³	$\Delta\lambda/\lambda_{max}$, %	C _{опт} , 10 ⁻⁴ , %
1.	ПАА265-1	ИВС	д.в.	10	63	6
2.	ПАА265-2	ИВС	д.в.	10	62	10
3.	ПАА265-3	ИВС	д.в.	10	62	11
4.	ПАА265-4	ИВС	д.в.	10	>5	10 ³
5.	ПААВМЛ50	ИВС	д.в.	10	62	23
6.	ПАА	ИВС	д.в.	9	57	900
7.	ПАА	ИВС	д.в.	9	>10	10 ³
8.	ПАА	ИВС	д.в.	5	43	13
9.	ПАА	ИВС	д.в.	7	47	20
10.	ПАА	ИВС	д.в.	9	51	25
11.	ГПАА-1	НИФХИ	д.в.	5	39	10
12.	ГПАА-1	НИФХИ	д.в.	7	44	14
13.	ГПАА-1	НИФХИ	д.в.	9	49	20
14.	ГПАА-2	НИФХИ	д.в.	10	56	11
15.	ГПАА-3	НИФХИ	д.в.	10	54	15
16.	ГПАА-4	НИФХИ	д.в.	10	56	17
17.	ГПАА-5	НИФХИ	д.в.	10	53	13
18.	ПАА-6	НИФХИ	д.в.	10	56	35

№ п/п	Полимер и его обозначение	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление			
			Растворитель	Re, 10 ³	$\Delta\lambda/\lambda$ max, %	Сопт, 10 ⁻⁴ , %
19.	ПАА-2	НИФХИ	д.в.	5	46	4,0
20.	ГПАА-3	НИФХИ	д.в.	5	45	5,5
21.	ГПАА-4	НИФХИ	д.в.	5	45	6,0
22.	ГПАА-5	НИФХИ	д.в.	5	42	7,4
23.	ПАА-6	НИФХИ	д.в.	5	45	14
24.	ПАА-2	НИФХИ	д.в.	-	66,4	7
25.	ГПАА-3	НИФХИ	д.в.	-	64	20
26.	ГПАА-7	НИФХИ	д.в.	-	65	20
27.	ГПАА-3	НИФХИ	pH=2	-	64	74
28.	ГПАА-3	НИФХИ	pH=5,3	-	65	30
29.	ГПАА-3	НИФХИ	pH=10	-	64	25
30.	ПАА-2	НИФХИ	pH=2	-	64	30
31.	ПАА-2	НИФХИ	pH=5,3	-	65	25
32.	ПАА-2	НИФХИ	pH=10	-	64	25
33.	ПАА 0,53/WSR	ИВС	д.в.	-	69	7
34.	ПАА 0,532/0,04	ИВС	д.в.	-	69	7
35.	ПАА ВМ0,53/1000	ИВС	д.в.	-	69	9
36.	ПАА ВМ0,53/0,04	ИВС	д.в.	-	68	10
37.	ПАА Б0103	ИВС	д.в.	-	66	7
38.	ПАА Б0105	ИВС	д.в.	-	65	8
39.	ПАА Б0108	ИВС	д.в.	-	67	10
40.	ПЭО-1	НПО	0,05%р-р КJ	-	64	8
41.	ПЭО-2	НПО	0,05%р-р КJ	-	64	6
42.	ПЭО-3	НПО	0,05%р-р КJ	-	64	7
43.	ПЭО-4	НПО	0,05%р-р КJ	-	61	200
44.	ПЭО WSR301	УС	0,05%р-р КJ	-	62	8
45.	ПЭО Coagulant	УС	0,05%р-р КJ	-	61	5
46.	ПЭО WSR301	УС	10 % р-р ац.	-	61	10
47.	ПЭО	ВДН	д.в.	10	60	24
48.	ПЭО	УС	д.в.	10	59	50
49.	ГПАА Cs-6	Яп.	pH =2	10	64	76
50.	ГПАА Cs-6	Яп.	pH =5,3	-	64	40
51.	ГПАА Cs-6	Яп.	pH =10	-	65	35
52.	ГПАА Cs-6	Яп.	pH =3,4	-	60	45
53.	ГПАА Cs-6	Яп.	д.в.	5	49	6
54.	ГПАА Cs-6	Яп.	д.в.	10	53	20
55.	ПАА OWP	ФРГ	д.в.	5	39,5	6
56.	ПАА OWP	ФРГ	д.в.	7	43,5	10
57.	ПАА OWP	ФРГ	д.в.	9	47,5	13
58.	ГПАА OWP	ФРГ	д.в.	5	39	6,6
59.	ГПАА OWP	ФРГ	д.в.	7	44	10
60.	ГПАА OWP	ФРГ	д.в.	9	45,5	20
61.	ПАА OWP	ФРГ	р-р NaCl 0,5M	5	42,5	5
62.	ПАА OWP	ФРГ	р-р NaCl 0,5M	7	47	10
63.	ПАА OWP	ФРГ	р-р NaCl 0,5M	9	51	13

№ п/п	Полимер и его обозначение	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление			
			Растворитель	Re, 10 ³	$\Delta\lambda/\lambda$ max, %	$C_{опт}$, 10 ⁻⁴ , %
64.	ГПАА ОWP	ФРГ	p-p NaCl 0,5M	5	40,5	5,6
65.	ГПАА ОWP	ФРГ	p-p NaCl 0,5M	7	45,5	10,5
66.	ГПАА ОWP	ФРГ	p-p NaCl 0,5M	9	49	16
67.	ГПАА 266-3	ИВС	д.в.	10	62	10
68.	РПАА ВМ-151	ИВС	д.в.	10	56,5	26
69.	РПАА ВМ-152	ИВС	д.в.	10	58	18
70.	РПАА ВМ-154	ИВС	д.в.	10	58	13,5
71.	РПАА ЭП-9-0	ИВС	д.в.	-	50	14
72.	РПАА ОП-9-18	ИВС	д.в.	-	48	5
73.	РПАА ОП-9-33	ИВС	д.в.	-	55	4
74.	РПАА ОП-9-0	ИВС	д.в.	-	<68	20
75.	РПАА ОП-9-18	ИВС	д.в.	-	<62	20
76.	РПАА ОП-9-33	ИВС	д.в.	-	<60	20

Примечание: Образцы 33÷46 испытаны при $t, ^\circ\text{C} = 20$; остальные при $t, ^\circ\text{C} = 25$.

№ п/п	Полимер и его обозначения	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление				
			Растворитель	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau_w, \text{н/м}^2 / \text{Re}, 10^3$	$(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{max}}, \%$	$C_{опт}, 10^{-4}, \%$
1.	ПАК Versicol 25	АСВ	pH = 5,8	25	173/-	62	22
2.	ПАК Versicol 21	АСВ	pH = 5,8	25	173/-	58	180
3.	ПАК Versicol 17	АСВ	pH = 5,8	25	173/-	59	750
4.	ГПАА Magniflock 351	АСВ	pH = 5,8	25	173/-	64	16
5.	ПЭО WSR-301	УС	д.в.	25	173/-	64	18
6.	ПАК Versicol S-25	АСВ	pH = 5,8	25	13,1/-	67	7
7.	ПАК Versicol E-21	АСВ	pH = 5,8	25	13,1/-	24	200
8.	ПАК Versicol E-17	АСВ	pH = 5,8	25	13,1/-	12	220
9.	ГПАА Magniflock	АСВ	pH = 5,8	25	13,1/-	65	21
10.	ПЭО WSR-301	УС	д.в.	25	13,1/-	63	55
11.	ПАК Versicol S-25	АСВ	pH = 8,2	25	-/11,7	65	10
12.	ПАК Versicol S-25	АСВ	pH = 2,2	25	-/11,7	60	~300
13.	ПЭО WSR-301	УС	д.в.	25	-/11,7	65	40
14.	ГПАА Separan AP 273	ДС	pH = 2,1	25	-/14,5	38	32
15.	ГПАА Separan AP 273	ДС	pH = 7,0	25	-/14,5	36	6
16.	ГПАА Separan AP 273	ДС	pH = 12	25	-/14,5	39	5
17.	ПЭО WSR-301	УС	д.в.	25	-/14,5	36	18,5
18.	ПЭО WSR-3000	УС	д.в.	25	-/14,5	18	1550
19.	ПАК Versicol 25	АСВ	pH = 5,6	25	-/14,5	34	50
20.	ПАК Versicol 25	АСВ	pH = 7,1	25	-/4,5	34	18
21.	ПАК Versicol 25	АСВ	pH = 9,7	25	-/14,5	38	19
22.	ПЭО WSR-301	УС	в.в.	20	-/150	70	12
23.	ПЭО WSR-301	УС	в.в.	20	-/60	62	12
24.	ПЭО WSR-501	УС	в.в.	20	-/30	44	12

№ п/п	Полимер и его обозначения	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление				
			Растворитель	t, °C	$\tau_w, \text{н/м}^2 / \text{Re}, 10^3$	$(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{max}}, \%$	$C_{\text{опт}}, 10^{-4}, \%$
25.	ПЭО WSR-N-10 Смесь GM 0220	UC	д.в.	21	-/14	33,4	10000
26.	ПЭО WSR-N-80 Смесь GM 0242	UC	д.в.	21	-/14	53,5	5000
27.	ПЭО WSR-N-750 Смесь GM 0222	UC	д.в.	21	-/14	65,0	500
28.	ПЭО WSR-N-3000 Смесь GM 0253	UC	д.в.	21	-/14	64,0	500
29.	ПЭО WSR-35 А 2617	UC	д.в.	21	-/14	65,0	400
30.	ПЭО WSR-205 Смесь А 2529	UC	д.в.	21	-/14	66,5	150
31.	ПЭО WSR-301 Смесь А 3507	UC	д.в.	21	-/14	63,7	30
32.	ПЭО WSR-301 Смесь 3538-20	UC	д.в.	21	-/14	67,0	30
33.	ПЭО WSR-301 5-18-S 4-6	UC	д.в.	21	-/14	67,2	20
34.	ПЭО WSR-301 Смесь 3413 (100 mech)	UC	д.в.	21	-/14	67,0	20
35.	ПЭО WSR-301Смесь 3412	UC	в.в.	21	-/14	66,7	20
36.	ПЭО WSR -301 17- DS-54-6	UC	д.в.	21	-/14	64,0	20
37.	ПЭО WSR-701 Пачка 3270	UC	д.в.	21	-/14	66,7	15
38.	ПЭО Смесь 3260	UC	д.в.	21	-/14	67,2	15
39.	ПЭО FRA Смесь 8214	UC	д.в.	21	-/14	67,8	15
40.	Radel WД-АА-40001 чистый	UC	д.в.	21	-/14	63,5	500
41.	Radel WFAА-4050 белый	UC	д.в.	21	-/14	64,7	300
42.	Radel (701)	UC	д.в.	21	-/14	65,3	300
43.	ГС JaGuar control А 40F 7-3260	-	д.в.	21	-/14	68,9	300
44.	ГС JaGuar N 31-2745	-	д.в.	21	-/14	68,5	300
45.	ГС Burtonite R _x =7=А	В	д.в.	21	-/14	69,0	200
46.	ПАА Caldon Д 252	С	д.в.	21	-/14	64,5	100
47.	ПАА Ximmite	Z	д.в.	21	-/14	67,4	70
48.	ГПАА Separan AP-30 (325 mech)	DC	д.в.	21	-/14	67,5	70
49.	ПАА Polyhall 654	-	д.в.	21	-/14	62,5	70
50.	ГПАА Separan AP-30 (70-200 mech)	DC	д.в.	21	-/14	64,5	70
51.	ПАА Nalcolyte 670 партия 5041	NC	д.в.	21	-/14	67,3	70

№ п/п	Полимер и его обозначения	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление				
			Растворитель	t, °C	τ_w , н/м ² / Re, 10 ³	$(\Delta\lambda/\lambda)_{\max}$, %	C _{опт} , 10 ⁻⁴ , %
52.	ПАА Dowellj-100	DC	д.в.	21	-/14	67,8	50
53.	ПАА Nalcolyte 673 партия 4273	NC	д.в.	21	-/14	68,1	30
54.	ПАА Nalcolyte 672 (325 mech)	NC	д.в.	21	-/14	67,7	30
55.	ГПАА Separan AP-30	DC	д.в.	21	-/14	65,0	20
56.	ПАА Nalcolyte 674 Д- 1940А Партия 4338	NC	д.в.	21	-/14	68,8	20
57.	ПАА Polyhall 295 Control № 45-6578	SH	д.в.	21	-/14	69,4	20
58.	ПАА 451 MD	H	д.в.	21	-/14	66,5	14
59.	Primaflor C-7 партия 808	RH	д.в.	21	-/14	50	1000
60.	Natrosol 250H партия 1096	H	д.в.	21	-/14	63	1000
61.	Metrocel партия 11228AE	DC	д.в.	21	-/14	21,5	1000
62.	ПАК 102-47-1002С	BFG	д.в.	21	-/14	36	1000
63.	Полимер 705 DA Control № 10-1595-1	SH	д.в.	21	-/14	66,8	500
64.	Полимер 705 DB Control № 10-15-13	SH	д.в.	21	-/14	62,5	1000
65.	Salmon Sprem DNA партия 40039	SC	д.в.	21	-/14	53,1	200
66.	Calf Thymus ДНК 34 ВО 720	SC	д.в.	21	-/14	66,9	200
67.	Hyaluronic Acid партия 14Б-1060	SH	д.в.	21	-/14	32,3	200
68.	Locust Bean Gum Pre-gelatinized	HAP	д.в.	21	-/14	39,2	1000
69.	Locust Bean Gum Halian №1	HAP	д.в.	21	-/14	36,9	1000
70.	Locust Bean Gum Д- 200Д	M	д.в.	21	-/14	66,0	800
71.	Gum Karaya, NF	HAP	д.в.	21	-/14	67,0	825
72.	Порошок Окра. Стандартное качество	HAP	д.в.	21	-/14	38,6	1000
73.	Gum Tragacanth USP	HAP	д.в.	21	-/14	44,5	2000
74.	Kelzan N- 44-71-116	K	д.в.	21	-/14	64,7	400
75.	Sea Kem 7 (Carrageenan)	HAP	д.в.	21	-/14	57,9	2000
76.	Sea Kem LCM (Carrageenan)	HAP	д.в.	21	-/14	23,1	2000
77.	Sea Tex HCB	HAP	д.в.	21	-/14	43,1	2000

№ п/п	Полимер и его обозначения	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление				
			Растворитель	t, °C	$\tau_w, \text{н/м}^2 / \text{Re}, 10^3$	$(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{max}}, \%$	$C_{\text{опт}}, 10^{-4}, \%$
78.	Gelcarin HWG (Carrageenan)	НАР	д.в.	21	-/14	57,0	1500
79.	Sodium Alginate	NSRI	д.в.	21	-/14	64,0	750
80.	Irish Moss Stamere NK	М	д.в.	21	-/14	57,7	1000
81.	Irish Moss Stabiloid IS	SH	д.в.	21	-/14	63,0	1750
82.	Burtonite 44A (Furcelleran)	В	д.в.	21	-/14	46,8	1000
83.	Burtonite 1K-LV-CP (Carrageenan)	В	д.в.	21	-/14	62,1	1400
84.	Viscarin 271206 (Carrageenan)	МС	д.в.	21	-/14	61,8	1000
85.	Viscarin 402 Lambda (Carrageenan)	МС	д.в.	21	-/14	52,9	1000
86.	Gelcarin HMR 230206 (Ca Carrageenan)	МС	д.в.	21	-/14	51,6	1000
87.	Eucheuma Cottonii Rella 5166	МС	д.в.	21	-/14	29,5	1000
88.	Gelcarin SI 672106 (Ca Carrageenan)	МС	д.в.	21	-/14	31,8	1000
89.	Agardhiella RELA 5167	МС	д.в.	21	-/14	62,5	750
90.	Avitene (Collagen)	FMC	д.в.	21	-/14	53,0	1350
91.	ПЭО WSR-301 смесь 3413	УС	28 % р-р глицерина	21	-/14	60,5	10
92.	ПЭО WSR-301 смесь 3413	УС	39 % р-р глицерина	21	-/14	55,4	10
93.	ПЭО WSR-301	УС	45 % р-р глицерина	21	-/14	50,5	5
94.	ПЭО WSR-301	УС	-	21	-/14	66,7	30
95.	ПЭО WSR-301 смесь 3413	УС	6 % р-р Dextran (инъекция)	21	-/14	57,5	16
96.	ПЭО WSR-301 смесь 3413	УС	Плазма человека (антигемофильная)	21	-/14	61,5	10
97.	ПЭО WSR-301 смесь 3413	УС	Анизол	21	-/14	66,2	30
98.	Полиадениловая кислота S-13.1 Control # 112427	МCh	Буферный р-р 0,15M NaCl0,15M Na цитрат; pH =7,7;	21	-/14	19,1	500

№ п/п	Полимер и его обозначения	Изготовитель	Гидродинамическое сопротивление				
			Растворитель	t, °C	τ_w , н/м ² / Re, 10 ³	$(\Delta\lambda/\lambda)_{\max}$, %	C _{опт} , 10 ⁻⁴ , %
99.	Calf Thymus ДНК 341BO720	SC	Цитратный буфер pH = 7,7	21	-/14	64,1	200
100.	Salmon Sperm ДНК Партия 40039	SC	- " - pH = 8	21		68,4	200
101.	ПАА Praestol 3000/74	CFS	д.в.	20	-/14	68,0	17
102.	ГПАА Praestol 2700	CFS	д.в.	20	-/14	69,0	8
103.	ГПАА Praestol 2700	CFS	10 ⁻⁶ % Fe(NO ₃) ₃	20	-/14	69,0	8
104.	ПАА Praestol 3000/74	CFS	3x10 ⁻⁶ % Fe(NO ₃) ₃	20	-/14	69,0	>25
105.	КПАА Praestol 411К	CFS	д.в.	20	-/14	67,0	>20
106.	КПАА Praestol 411К	CFS	10 ⁻⁶ % Fe(NO ₃) ₃	20	-/14	67,0	>20
107.	ПАА Polyhall 295	SH	д.в.	20	-/14	67,0	>20
108.	ПАА Polyhall 295	SH	д.в.	20	-/14	~67,0	>25
109.	ПАА Polyhall 430-Н 2	SH	д.в.	20	-/14	69,0	12
110.	ПАА Polyhall 430-Н 2	SH	10 ⁻⁶ % Fe(NO ₃) ₃		-/14	68,0	>20
111.	ПАА Polyhall	SC	д.в.	20	-/14	69,0	20
112.	ПАА Calgon	C	10 ⁻⁶ % Fe(NO ₃) ₃	20	-/14	69,0	>20
113.	ПЭО Coagulant	UC	д.в.	20	-/9	69,0	5
114.	ПЭО WSR-205	UC	д.в.	20	-/9	70,0	22
115.	ПЭО WSR-1105	UC	д.в.	20	-/9	69,0	19
116.	ПЭО WSR-N-750	UC	д.в.	20	-/9	-	25
117.	ПЭО	UC	д.в.	20	-/20	66,0	90
118.	ПЭО	BDH	д.в.	20	-/20	65,0	110
119.	ПЭО	UC	д.в.	20	-/6	54,0	80
120.	ПЭО	BDH	д.в.	20	-/6	53,0	110
121.	ПЭО	BDH	д.в.	20	-/30	-	150
122.	ПЭО	UC	д.в.	20	-/30	-	90
123.	ПЭО	BDH	д.в.	20	-/30	-	30
124.	ПЭО	UC	д.в.	20	-/30	-	15
125.	ПАА-1	ЛО	д.в.	20	-/12,4	28,0	55
126.	ПАА-2	ЛО	д.в.	20	-/12,4	31,5	45
127.	ПАА-3	ЛО	д.в.	20	-/12,4	35,5	55
128.	ПАА-4	ЛО	д.в.	20	-/12,4	40,6	10
129.	ПАА-5	ЛО	д.в.	20	-/12,4	39,1	6

Приложение Б. Твердые частицы и композиции на их основе для снижения гидродинамического сопротивления воды

№ п/п	Состав композиций	Концентрация основных компонентов, % вес. (соотношение компонентов в в.ч.)	Условия проведения эксперимента		Величина эффекта снижения сопротивления, %
			Внутренний диаметр трубопровода, мм.	Re*10 ⁻³	
1.	2.	3.	4.	5.	6.
1.	Волокно крафт-целлюлозы	0,25	100	1,0	-7,1
		0,25	100	50	53
		0,25	100	100	40
		0,42	100	260÷540	35
		0,79	100	430÷1010	26
2.	Волокно сульфитной целлюлозы	0,119	100	30	45
		0,122	100	50	52
		0,183	100	150	50
		0,184	100	200	37
3.	Древесное волокно	0,21÷1,17	53	50	31
		0,21÷1,17	100	150	43
4.	Волокно асбеста	0,1÷0,25	24	14÷40	22÷30
		0,1÷0,25	50	14÷40	34÷38
		0,025÷0,1		14÷40	60÷70
		0,01÷0,1	1.15	20	40÷60
		0,01÷0,1	14,3	20	40÷60
5.	Волокно асбеста+ПАА	(0,1÷0,25) + 0,01	24	14	70÷75
			50	14	75÷80
6.	Волокно асбеста	0,01 0,03 0,03 0,03	6	10÷35	45
			18,5	20	45
			18,5	40	45
			18,5	60	45
7.	Волокно асбеста+ПЭО	0,05 + 0,005	24÷70	14	70÷75
8.	Волокно асбеста+ПЭО	0,05 + 0,005	242	3,5*10 ³ ÷ 2*10 ⁴	72÷78
9.	Волокно асбеста+ПАВ (метаупон) + 8 % NaCl	0,6 +	7	23÷40	50÷72
		0,3 +	19	23÷40	
		0,8			
10.	Метаупон + NaCl+ПЭО + асбестовое волокно	0,15 + 7,5 + 0,005 + 0,05	20	3÷20	18÷76
11.	ПЭО+алкилсульфат натрия+асбестовое молоко	0,005 + 0,1 + 0,05	20	25÷40	44÷72

№ п/п	Состав композиций	Концентрация основных ком- понентов, % вес. (соотношение компонентов в в.ч.)	Условия проведения эксперимента		Величина эффекта снижения сопротив- ления, %
			Внутренний диаметр тру- бопровода, мм.	Re*10 ⁻³	
12.	Волокно нейлона	1,0÷4,0 1,0÷4,0	6,3	14÷40	30÷42
			25,5	14÷40	27÷44
13.	Волокно ней- лона+ПАА	0,5 +0,005	51,2	35	67
14.	Волокно из нитей искус- ственного шелка	5÷24	73	62,5÷136	40÷42

Приложение В. Композиции на основе МПАВ для снижения гидродинамического сопротивления трения воды

№ п/п	Состав композиций	Содержание компонентов в композиции, % (соотношение, в в.ч.)	Температурный диапазон проявления эффекта, t °С	Оптимальная концентрация композиции, С _{опт} , %			Δλ/λ, % при С _{опт} ,
				ПАВ	Др. компонентов	Суммарная	
1.	Цетилпиридиний хлорид + α-нафтол	(2,5÷1,0)	10÷50	0,065	0,025	0,09	75
2.	Цетилпиридиний бромид + α-нафтол	(2,7÷1,0)	25÷90	0,060	0,022	0,082	72
3.	Цетилпиридиний иоид + α-нафтол	(4,7÷1,0)	42÷80	0,037	0,008	0,045	66
4.	Цетил-γ-пиколиний бромид + α-нафтол	(2,1÷1,0)	22÷50	0,032	0,017	0,049	59
5.	Цетил-γ-пиколиний бромид + α-нафтол	(2,1÷1,0)	25÷80 20÷80	0,032 0,068	0,017 0,032	0,049 0,10	65 60÷65
6.	Цетилтриметиламмоний бромид + α-нафтол	(2,5÷1,0)	20÷30	0,071	0,029	0,10	65
7.	Цетилпиридиний иоид	1 % и выше	40÷80	1,0	-	1,0	60
8.	Метаупон + NaCl (хладоноситель)	(0,3÷3,6) + (7,5÷8,3)	18 3,5÷35	0,3 0,4	8,0 8,3	8,3 8,7	55 52
9.	Диталан-OTS + NaCl	(0,6÷2,4) + 3,0	18 9,5÷14	1,2 1,33	3,0 3,0	4,2 4,33	55 67
10.	Пальмитат натрия	(0,015÷0,15)	42	0,09	-	0,09	60
11.	Миристанат натрия	(0,2÷0,3)	25	0,26	-	0,26	60
12.	Пальмитат натрия + Стеарат натрия	(0,6÷0,4) (0,4÷0,6) (0,2÷0,8) (1,0÷0,0)	50 50 50 50	0,075 0,15 0,15 0,15	- - - -	0,675 0,15 0,15 0,15	72 70 55 48
13.	Тетрадецилсульфат натрия + NaCl	(0,08 + 1,75)	40÷65	0,08	1,75	1,83	60
14.	Пентадецилсульфат натрия + гексадецилсульфат натрия + NaCl	0,08 + 0,08 + 1,75	35÷65	0,16	1,75	1,91	63

№ п/п	Состав композиций	Содержание компонентов в композиции, % (соотношение, в в.ч.)	Температурный диапазон проявления эффекта, t °С	Оптимальная концентрация композиции, С _{опт} , %			Δλ/λ, % при С _{опт} ,
				ПАВ	Др. компонентов	Суммарная	
15.	Тетрадецилсульфат натрия + Пентадецилсульфат натрия + гексадецилсульфат натрия + NaCl	0,06 + 0,81 + 0,06 + 1,75	35÷70	0,20	1,75	1,95	64
16.	Олеат натрия + KCl	0,2 + 6,0	25÷30	0,2	6,0	6,2	65
17.	Метаупон + NaCl + Na ₂ CO ₃	0,5 + 4,3 + 3,5	30÷80 30÷75	0,5 0,5	7,8 7,8	8,3 8,3	60 40÷45
18.	Миристант сахарозы	0,3	25	0,3	-	0,3	65÷70
19.	N-окись тетрадециламина	0,15	25	0,15	-	0,15	65÷70
20.	Моноэтаноламид синтетических жирных кислот	1,0	30÷95	1,0	-	1,0	55÷60
21.	Стеарат натрия (мыло хозяйственное)	0,2	10÷35	0,2	-	0,2	55
22.	Пальмитат натрия	0,15	40÷44	0,15	-	0,15	55
23.	Миристант натрия	0,20	24÷26	0,2	-	0,2	55
24.	Цетилпиридиний роданид	0,38	42÷55	0,38	-	0,38	30÷40
25.	ПЭО + ПО-3А (пенообразователь)	0,01 + (3-6)	25	3-6	0,01	(3-6)+0,01	50
26.	Метаупон + NaCl	(0,15÷1,5)+ (10,5÷11,0)	20	0,20	11,0	11,2	44
27.	СВ-102 + NaCl	(0,18÷1,3) + (1,5÷3,0)	20	0,4	2,0	2,4	45
28.	Риципекс К9 + NaCl	0,83 + (0,67÷2,0)	20				47
29.	СВ-102 + NaNO ₂	(0,23÷0,80) + 1,5	10÷75	0,6	1,5	2,1	48
30.	Диталан-OTS + NaCl	0,8 + 3,0	20	0,8	3,0	3,8	57
31.	Диталан-OTS + NaNO ₂	0,8 + 0,3	20	0,8	3,0	3,8	57
32.	Метаупон + NaNO ₂	0,8 + 8,0	20	0,8	8,0	8,8	60