

УДК 532.529  
ББК 22.253.3  
М73

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Казанского национального исследовательского технологического университета*

*Рецензенты:  
д-р техн. наук, проф. Ф. М. Галимов  
директор НПО «Метрология» В. В. Рыжов*

**Авторы:** **В. Н. Петров**, Ю. К. Евдокимов, К. А. Левин,  
С. Л. Малышев, В. Ф. Сопин, А. Ф. Батталов, Я. В. Денисова

**М73** Многофазные испытательные стенды газожидкостных смесей: аппараты, аттестация, воспроизведение : монография / В. Н. Петров, Ю. К. Евдокимов, К. А. Левин [и др.] ; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2022. – 196 с.

ISBN 978-5-7882-3181-5

Рассмотрены физические принципы, лежащие в основе метрологического обеспечения расхода многофазных потоков. Освещены вопросы обеспечения единства измерений, методологии и применения средств поверки многофазных расходомеров и измерительных систем. Рассмотрен широкий круг вопросов по расчету потоков различной структуры в конкретных технических условиях.

Предназначена для метрологов, специалистов и научных сотрудников, аспирантов и студентов, занимающихся исследованием многофазных потоков и вопросами метрологического обеспечения измерений расхода и количества газожидкостных потоков, а также для конструкторов и инженеров, занимающихся проектированием поверочных установок.

Подготовлена на кафедре аналитической химии, сертификации и менеджмента качества.

**УДК 532.529**  
**ББК 22.253.3**

ISBN 978-5-7882-3181-5

© **Петров В. Н.**, Евдокимов Ю. К., Левин К. А.,  
Малышев С. Л., Сопин В. Ф., Батталов А. Ф.,  
Денисова Я. В., 2022

© Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	8
1. ПОВЕРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА ОДНОФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ.....	13
1.1. Метрологическое обеспечение учета однофазных потоков.....	13
1.2. Вопросы совершенствования установок поверки и калибровки однофазных расходомеров.....	18
1.3. Анализ подобия пары «скважина – эталон» .....	28
1.4. Конфигурация многофазных испытательных стендов .....	29
1.5. Аттестация эталонных средств воспроизведения расхода.....	40
2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В АППАРАТАХ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКИХ ФАЗ .....	46
2.1. Аппарат перемешивания жидких компонент .....	46
2.2. Расчет равномерной подачи смеси.....	47
2.3. Расчет равномерного отбора смеси.....	52
2.4. Математическое моделирование процесса циркуляционного перемешивания.....	57
2.5. Математическое моделирование процесса перемешивания двухкомпонентной жидкой смеси.....	64
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ С ПЕРИФЕРИЙНЫМ ЖИДКИМ ПОТОКОМ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ .....	69
3.1. Аппарат перемешивания и режимы течения осесимметричного газожидкостного потока.....	69
3.2. Математическое моделирование перемешивания газовой струи с периферийным жидким потоком.....	74
3.2.1. Модель газожидкостного потока, развивающегося в пределах начального участка газовой струи.....	74
3.2.2. Модель газожидкостного потока, развивающегося в пределах переходного участка .....	85
3.2.3. Расчет параметров газовой струи, развивающейся в канале при наличии спутного жидкого потока.....	91
3.2.4. Модель процесса перемешивания спутных двухфазных потоков .....	95

4. ВЛИЯНИЕ ПРИСУТСТВИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОФАЗНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ЖИДКОСТИ .....	102
4.1. Вихревой расходомер в многофазном потоке .....	102
4.2. Влияние газовой фазы на метрологические характеристики кориолисовых массометров .....	108
5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО СПЕЦИАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ МАССОВОГО РАСХОДА ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ .....	119
5.1. Сепарация газожидкостного потока .....	119
5.1.1. <i>Расслоение газожидкостного потока</i> .....	119
5.1.2. <i>Конструктивные особенности входного устройства сепаратора</i> .....	128
5.1.3. <i>Расчет течения смеси во входном устройстве сепаратора</i> .....	135
5.2. Воспроизведение капельного и кольцевого режимов течения .....	141
5.2.1. <i>Физика распада струи</i> .....	141
5.2.2. <i>Особенности устройств, создающих капельный режим течения</i> .....	150
6. ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ТРЕХФАЗНЫХ ПОТОКОВ ЗАГАЗОВАННОЙ ПУЛЬПЫ .....	159
6.1. Физические свойства загазованной пульпы .....	161
6.2. Течение загазованной пульпы в канале .....	162
6.3. Влияние газовой фазы на приборы систем измерений расхода загазованной пульпы .....	167
6.4. Измерение расхода компонент загазованной пульпы .....	173
6.5. Систематическая погрешность систем измерений расхода загазованной пульпы .....	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	189
ГЛОССАРИЙ .....	194