

УДК 621.643/.644(075)
ББК 39.71-022с51.я73
П 179

Интернет-магазин
MATHESIS

<http://shop.rcd.ru>

- физика
- математика
- биология
- нефтегазовые технологии

Папуша А. Н.

Транспорт нефти и газа подводными трубопроводами: Проектные расчеты в компьютерной среде *Mathematica*. — М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. — 388 с.

В настоящих лекциях в электронном виде рассмотрены и представлены основные модели проектных расчетов транспорта углеводородного сырья наземными и подводными газо- и нефтепроводами. Все модели базируются на общих законах механики сплошных сред, а также на фундаментальных физических свойствах реальных газов и жидких углеводородов, т. е. на тех физических свойствах, которые представлены и описаны в отечественных и зарубежных стандартах. Кроме того, в лекциях также предложены и усовершенствованные методики расчета транспорта нефти и газа по магистральным трубопроводам, включая нестандартные процессы тепломассопереноса в трубах, в которых уточняются расчетные модели ряда физических явлений, присущих реальному газу, и которые присущи физическим свойствам газов и нефти.

Все лекции и привнесенные в них расчеты выполнены в открытых кодах компьютерной среды *Mathematica*, что позволяет выполнять моделирование и уточнение проектных расчетов трубопроводов напрямую, т. е. без переноса «ручных», как правило, аналитических, вычислений в компьютер, например, при моделировании процессов транспорта углеводородов по трубопроводам в компьютерном классе. Все это говорит о том, что разработанные в лекциях проектные методы расчета позволяют выполнять все символьные и численные расчеты непосредственно в университетском классе, будь то лекция или практическое занятие.

ISBN 978-5-4344-0022-0

ББК 39.71-022с51.я73

© А. Н. Папуша, 2011

<http://shop.rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

Мотивация	8
Введение	13
Часть 1. Транспорт одно- и многокомпонентного газа по магистральному трубопроводу: стационарные режимы течения	17
РАЗДЕЛ 1. Гидравлический расчет наземных газопроводов: практические расчеты физических параметров газов и их смесей .	19
1.1. Основные физические свойства газов	19
1.2. Основные физические законы состояния газов	43
1.3. Законы механики сплошных сред, используемые для описания течения нефти и газа в магистральных трубопроводах. Нормативные методы проектирования магистральных трубопроводов	59
1.3.1. Закон сохранения массы	59
1.3.2. Закон сохранения количества движения	60
1.3.3. Закон сохранения энергии	61
1.3.4. Стационарные течения флюида в магистральном трубопроводе	63
1.3.5. Соотношения размерности и коммерческий расход	66
1.3.6. Отечественные нормы проектирования магистральных газопроводов	68
1.3.7. Технологические расчеты магистральных газопроводов. Нормы ОНТП 51-1-85	70
1.3.7.1. Классификация газопроводов	70
1.3.7.2. Нормативные методы расчета отечественных газопроводов	70
1.3.7.3. Стационарные неизотермические течения газа. Сравнительные расчеты	76
1.3.7.4. Расчет коэффициента гидравлических сопротивлений при течении газа в цилиндрической трубе. Нормативные формулы расчета коэффициента гидравлических сопротивлений	84
1.3.8. Нормативный гидравлический расчет газопроводов на линейных участках	96
1.3.8.1. Исходные соотношения для технологических расчетов	96

1.3.8.2.	Пример 1.1. Расчет коммерческого объема газа	101
1.3.8.3.	Пример 1.2. Расчет рабочего давления в конце линейного участка трубопровода	102
1.3.8.4.	Пример 1.3. Расчет диапазона изменения давления газопровода	105
1.3.8.5.	Пример 1.4. Расчет количества газа в газопроводе при нормальных условиях	108
1.3.8.6.	Пример 1.5. Расчет течения газа при неизоэнтропичности потока	109
1.3.9.	Технологические расчеты магистральных нефте- и продуктопроводов	110
1.3.9.1.	Стационарные изотермические течения нефти	110
1.3.9.2.	Стационарные неизотермические течения нефти и нефтепродуктов	113
1.3.9.3.	Стационарные неизотермические течения нефти и нефтепродуктов. Зависимость коэффициента кинематической вязкости от температуры	120
1.3.9.4.	Стационарные неизотермические течения нефти и нефтепродуктов. Зависимость коэффициента кинематической вязкости и плотности нефти от температуры и давления	136

Часть 2. Транспорт многокомпонентного газа по магистральному газопроводу: проектные решения для подводных трубопроводов **145**

РАЗДЕЛ 2. Проектирование транспорта многокомпонентного газа со Штокмановского ГКМ	146
2.1. Проектные решения по нормам ОНТП 51-1-85	146
2.1.1. Исходные данные для проектирования подводного газопровода	147
2.1.2. Уточненные решения для Штокмановского ГКМ	152
2.1.3. Сравнительные показатели проектных решений для ответственных и импортных труб	157
РАЗДЕЛ 3. Эффект Джоуля–Томпсона для подводного газопровода	160
3.1. Транспорт газа со Штокмановского ГКМ при постоянном коэффициенте гидравлических сопротивлений	160
3.2. Стационарное течение газа с учетом эффекта Джоуля–Томпсона. Летние условия эксплуатации	168
3.3. Проектные решения для подводного газопровода со Штокмановского ГКМ. Учет зависимости вязкости газа от давления и температуры	175

РАЗДЕЛ 4. Проектирование подводного трубопровода с учетом рельефа дна моря	185
4.1. Исходные данные для расчета транспорта многокомпонентного газа со Штокмановского ГКМ	185
4.2. Рельеф дна Баренцева моря вдоль трассы трубопровода	189
4.2.1. Моделирование трассы подводного трубопровода	189
4.2.2. Сплайн-интерполяция трассы подводного трубопровода	190
4.2.3. Кусочно-линейная интерполяция	193
4.3. Уточненные проектные решения с учетом рельефа дна моря. Летние условия транспортировки газа	195
4.4. Транспорт при отрицательных начальных температурах газа	206
РАЗДЕЛ 5. Вариативность производительности подводного газопровода	211
5.1. Производительность газопровода на первой фазе освоения	211
5.1.1. Компонентный состав газа. Пример из OLGA	211
5.1.2. Коэффициент сжимаемости и коэффициент гидравлических сопротивлений в кодах <i>Mathematica</i>	212
5.2. Рельеф трассы подводного газопровода	217
5.2.1. Моделирование трассы подводного трубопровода	217
5.2.2. Сплайн-интерполяция трассы подводного трубопровода	218
5.2.3. Кусочно-линейная интерполяция	220
5.3. Варианты производительности подводного газопровода	222
5.3.1. Производительность подводного газопровода 30 млрд м ³ /год. Летние условия эксплуатации подводного газопровода	222
5.3.2. Производительность подводного газопровода 30 млрд м ³ /год. Зимние условия эксплуатации	227
5.3.3. Проектный расчет подводного газопровода с производительностью 23,7 млрд м ³ /год. Летние условия эксплуатации	233
5.3.4. Проектный расчет подводного газопровода с производительностью 23,7 млрд м ³ /год. Зимние условия эксплуатации	237
5.4. Проектный расчет подводного газопровода при отрицательных начальных температурах газа	241
РАЗДЕЛ 6. Расчет течения газа на двух участках	245
6.1. Расчет трубопровода на двух участках	245

Часть 3. Нестационарные течения газа и нефти в магистральном трубопроводе 249

РАЗДЕЛ 7. Уравнения нестационарного движения флюида в магистральном трубопроводе	250
7.1. 1D-система уравнений нестационарного течения нефти и газа в магистральном трубопроводе	250

7.1.1.	Вывод уравнений движения нестационарного течения газа на линейном участке	250
7.1.2.	Нестационарные течения газа. Объемный и массовый расход	253
7.2.	Волны давления газа в магистральном трубопроводе	257
7.2.1.	Вывод уравнений возмущенного движения газа	257
7.2.2.	Нестационарные, изотермические движения газа	260
7.2.2.1.	Символьные решения нестационарных уравнений течения газа. Ступенчатое возмущение давления	260
7.2.2.2.	Свободные волны давления в трубопроводе	262
7.2.2.3.	Изотермические волны давления и расхода газа с учетом вязкости газа	269
7.2.2.4.	Численные решения для вязких волн давления газа	276
7.2.2.5.	Нестационарные течения газа при периодическом возмущении	279
7.2.2.6.	Периодические волны давления на линейном участке. Символьные решения	282
7.2.2.7.	Изотермические нестационарные вязкие волны давления и расхода газа	288
7.2.2.8.	Численные решения для нестационарных волн давления с учетом сопротивления движению газа	293
7.2.2.9.	Импульс давления в газопроводе	298
7.2.2.10.	Распространение импульса давления газа в трубопроводе	300
7.3.	Нестационарные и неизотермические движения газа: Тепловые волны в газе	305
7.4.	Численные решения линейных, нестационарных, термобарических уравнений движения газа	309
7.4.1.	Решение исходной системы линеаризованных термобарических уравнений течения газа	309
7.5.	Нестационарное движение нефти	319
7.5.1.	Уравнения нестационарного, неизотермического течения нефти. Массовый расход нефти. Численные решения	319
7.5.2.	Нестационарные, изотермические течения нефти в магистральном нефтепроводе	335
7.5.2.1.	Скорость звука в нефти	335
7.5.2.2.	Символьные уравнения нестационарных, изотермических движений нефти в магистральном нефтепроводе	336
7.5.2.3.	Символьные решения уравнений течения нефти в нефтепроводе	338
7.5.2.4.	Численные решения для волновых движений нефти	343
7.5.3.	Изотермические течения вязкой нефти в магистральном нефтепроводе	346
7.5.3.1.	Расчет скорости звука в нефти	346
7.5.3.2.	Уравнения нестационарного течения вязкой нефти в кодах	346

7.5.3.3. Вязкие волны нефти в нефтепроводе. Символьные решения	347
7.5.4. Нестационарные вязкие волны в нефтепроводе. Численные решения для волн давления и расхода нефти	353

Часть 4. Проектные решения для транспорта сжиженного природного газа (LNG) 359

РАЗДЕЛ 8. Проектные решения для LNG технологий. Штокмановский проект	360
8.1. Физические свойства LNG, танки газозовозов, производительность технологических трубопроводов	360
8.1.1. Газозовы, танки для LNG	361
8.2. Стационарные изотермические течения сжиженного природного газа (LNG)	361
8.3. Стационарные неизотермические течения LNG по технологическому трубопроводу	365
8.4. Стационарные неизотермические течения LNG. Зависимость коэффициента кинематической вязкости и плотности LNG от температуры и давления	371
Заключение	380
Литература	381