

**Бабичева Елена Борисовна,**  
Ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»,  
Тюменский индустриальный университет,  
г. Тюмень

**Бабичев Дмитрий Андреевич,**  
Кандидат технических наук,  
Доцент кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов»,  
Тюменский индустриальный университет,  
г. Тюмень

### **АЛГОРИТМ РАБОТЫ ПРИКЛАДНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА НЕФТИ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ «ГОРЯЧЕЙ» ПЕРЕКАЧКИ ПО МАГИСТРАЛЬНОМУ НЕФТЕПРОВОДУ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА ПРОКЛАДКИ**

**Аннотация:** В статье изложены описание и алгоритм работы прикладного расчетного модуля для определения требуемой температуры предварительного подогрева нефти при расчете технологических режимов работы «горячего» нефтепровода комбинированного способа прокладки.

**Ключевые слова:** температурный режим, «горячая» перекачка, оперативное управление.

Центр добычи полезных ископаемых, в том числе нефти и газа, постепенно смещается за Полярный Круг. Вводятся в эксплуатацию новые, разведанные сравнительно недавно, месторождения и месторождения, законсервированные «до лучших времен» 30-50 лет назад. Согласно данным Центрального диспетчерского управления Топливо-энергетического комплекса Российской Федерации, доля добываемой в Арктической зоне нефти в общем объеме добычи в России на 2023 год составила 19,2 %. При этом, в соответствии с положениями «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации» и «Энергетической стратегии России», планируется увеличение объемов добычи до 26% к 2035 году. Таким образом, прирост добычи нефти в Арктической зоне РФ, составлявший 9,2 % в 2023 году, вырастет до значения 19,1% к 2035 году.

О необходимости промышленного освоения Арктики говорится и в Указе Президента Российской Федерации от 5 марта 2020 года №164 «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года». В частности, положениями Указа прямо предписывается разработка и внедрение технологий, имеющих критически важное значение для освоения Арктики, применение эффективных инженерно-технических решений в целях предотвращения повреждения элементов инфраструктуры вследствие глобальных климатических изменений и внедрение лучших доступных технологий, обеспечивающих снижение негативного воздействия на окружающую среду при осуществлении хозяйственной и иной деятельности предприятий. Прямым следствием исполнения положений приведенных выше федеральных документов является ввод в эксплуатацию и увеличение пропускной способности магистрального нефтепровода «Заполярье-Пур-Пе», выполненного комбинированным способом прокладки и предназначенного для транспортировки смеси высоковязких и высокозастывающих нефтей с предварительным и путевым подогревом.

В целях оптимизации интенсивности предварительного и путевого подогрева, группой специалистов Тюменского индустриального университета выполнено математическое



моделирование процессов тепло- и массопереноса при осуществлении перекачки нагретой нефти по магистральному нефтепроводу «Заполярье – Пур-Пе». В результате, на основе математического анализа статистических данных, получены аналитические зависимости изменения температуры транспортируемой среды на каждом технологическом участке МН.

Построены статическая и динамическая модели магистрального нефтепровода, осуществляющего «горячую» перекачку нефти, выполненного способом комбинированной прокладки. Результаты отражены в опубликованных работах [1,2,3,4,5,6,7,8,9]. На основании полученных математических зависимостей и построенных моделей разработан программный модуль для решения прямых и обратных задач корректировки и прогнозирования тепловых режимов при осуществлении «горячей» перекачки нефти по нефтепроводу комбинированной прокладки при низких и экстремально низких температурах окружающего воздуха. Данный модуль может использоваться эксплуатирующими организациями как для прогнозирования расходования энергоресурсов на подогрев нефти в рамках составления долгосрочных программ, так и для оперативного регулирования интенсивности подогрева при изменении технологических режимов перекачки (производительность, напор) и условий окружающей среды (температура окружающего воздуха).

На начальном этапе в модуль загружаются исходные данные:

- Порядковые номера контрольных пунктов (узлы запорной арматуры, входы и выходы нефтеперекачивающих станций и пунктов подогрева нефти);
- Фактическая протяженность участков нефтепровода между контрольными пунктами;
- фактическая температура окружающего воздуха, зафиксированная на контрольных пунктах штатными средствами контроля;
- производительность работы технологического участка магистрального нефтепровода;
- внутренний диаметр магистрального нефтепровода на технологическом участке;
- табличные коэффициенты изменения температуры, полученные в рамках математического моделирования.

Далее выполняется приведение единиц измерения к метрической системе. На основе исходных данных готовятся параметры модели участка:

- площадь внутреннего сечения трубопровода;
- скорость течения нефти;
- время прохождения конечного объема нефти контрольных пунктов;

Далее загружаются входные данные. Входные данные при загрузке размещаются на шкале времени. Проверок выхода за границы нет, так как это не влияет на расчет. Принято, что параметры среды равняются заданными на странице пока не будут переопределены. То есть, никаких интерполяций входных данных не производится, следовательно, искажений в них не вносятся.

В начале расчета инициализируется курсор. Под курсором понимается конечный объем нефти малого размера, который при движении по трубопроводу меняет свои параметры (температуру и скорость), в зависимости от того, где он движется. Курсор помещается в начало трубопровода, на нулевую отметку времени (рис. 1).



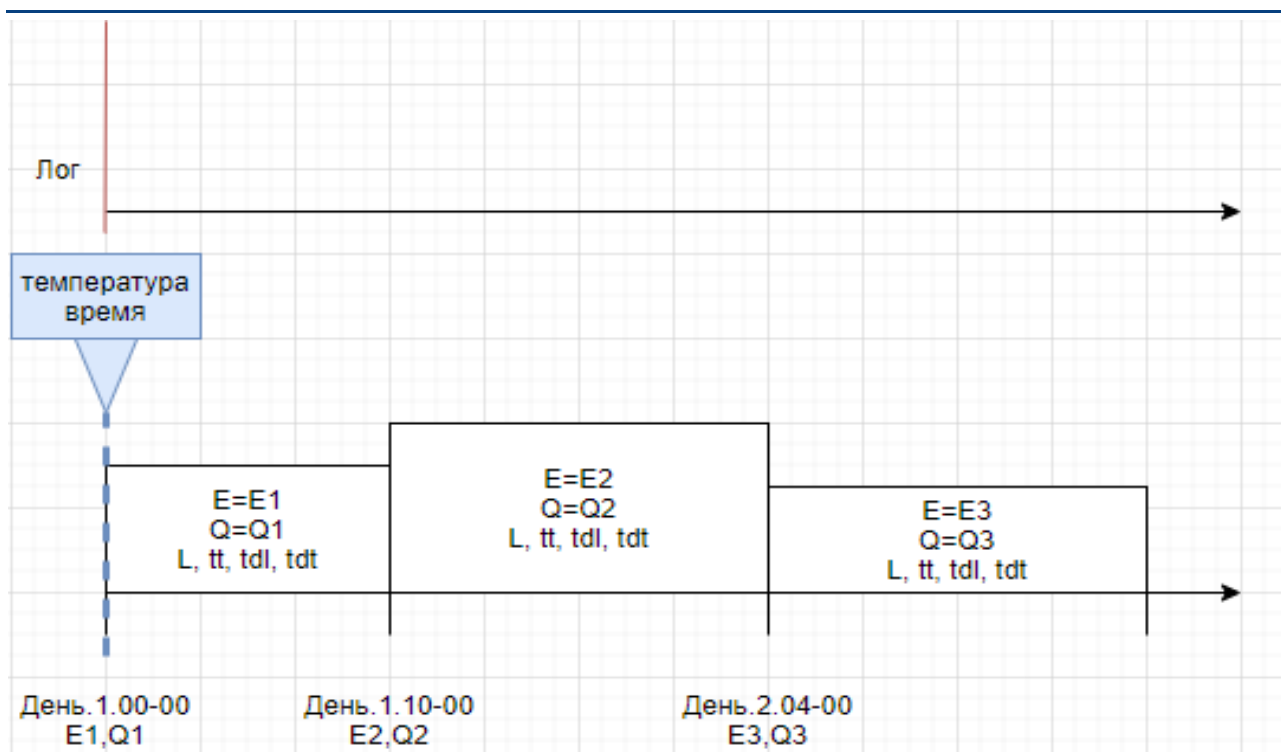


Рис. 1. Принцип работы с графической частью расчетного модуля (шаг 1)

На каждом шаге расчета в первую очередь определяются параметры системы, после чего выполняется смещение курсора по времени на шаг квантования, исходя из текущих параметров системы. Если при движении происходит изменение параметров, то шаг смещения уменьшается до количества пройденных зон и последовательно производится расчет на каждом граничном участке (рис. 2).

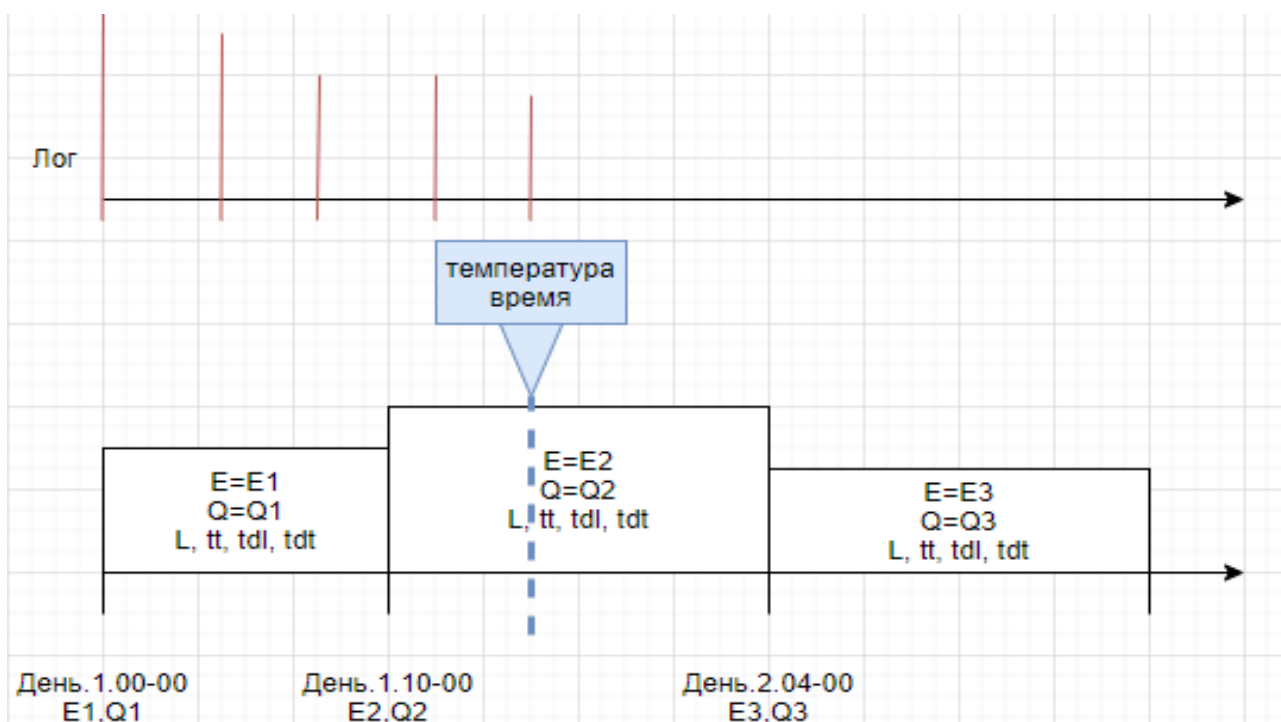


Рис. 2. Принцип работы с графической частью расчетного модуля (шаг 2)



При этом пройденное расстояние может отличаться от расстояния, пройденного в рамках условий первого отрезка. При движении по участкам определяется время нахождения в каждом из них и изменение температуры нефти в месте расположения курсора в зависимости от времени движения по трубопроводу. При переходе на следующий участок, фиксируется лог параметров курсора.

Отметки курсора, как правило, не совпадают с местоположением контрольных пунктов. Несмотря на это, параметры курсора записываются в лог в тех местах, в которых он фактически оказывается согласно расчетам. Движение курсора по трубопроводу осуществляется до тех пор, пока он не дойдет до последнего контрольного пункта или не выйдет за его границы (рис. 3).

Результатом такого расчета служит график изменения температуры нефти с учетом изменяющихся со временем условий в трубопроводе (рис. 4).

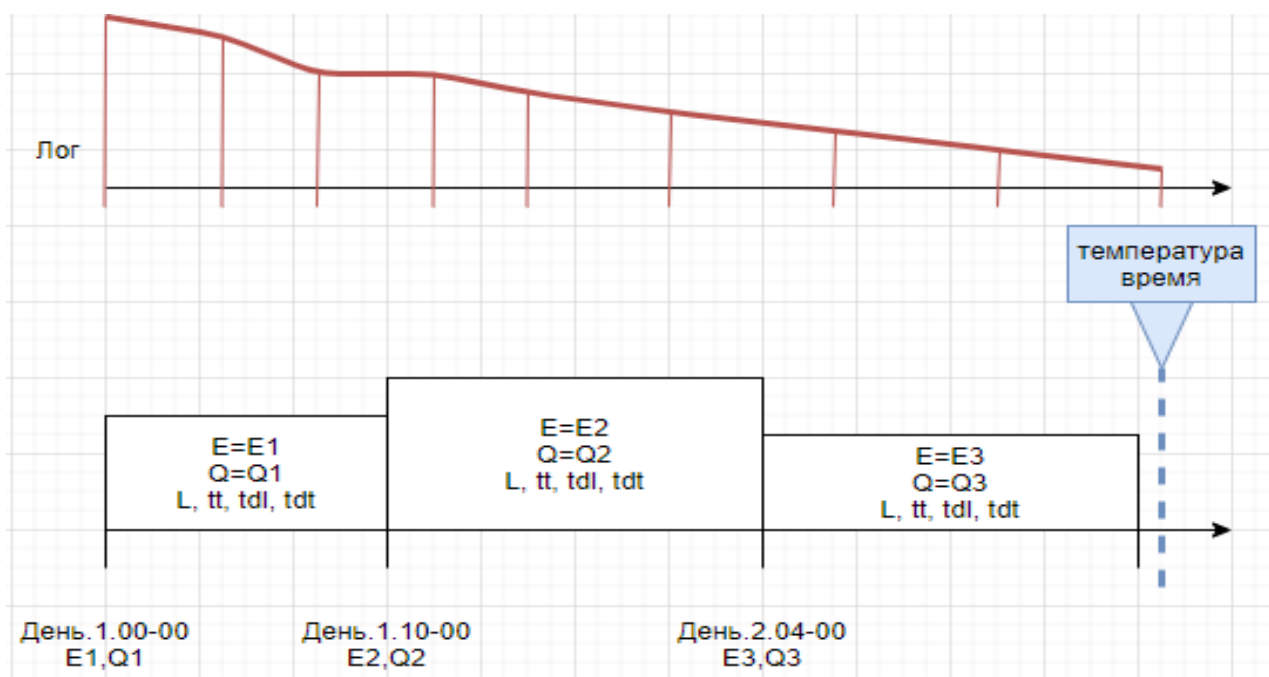


Рис. 3. Принцип работы с графической частью расчетного модуля (шаг 3)

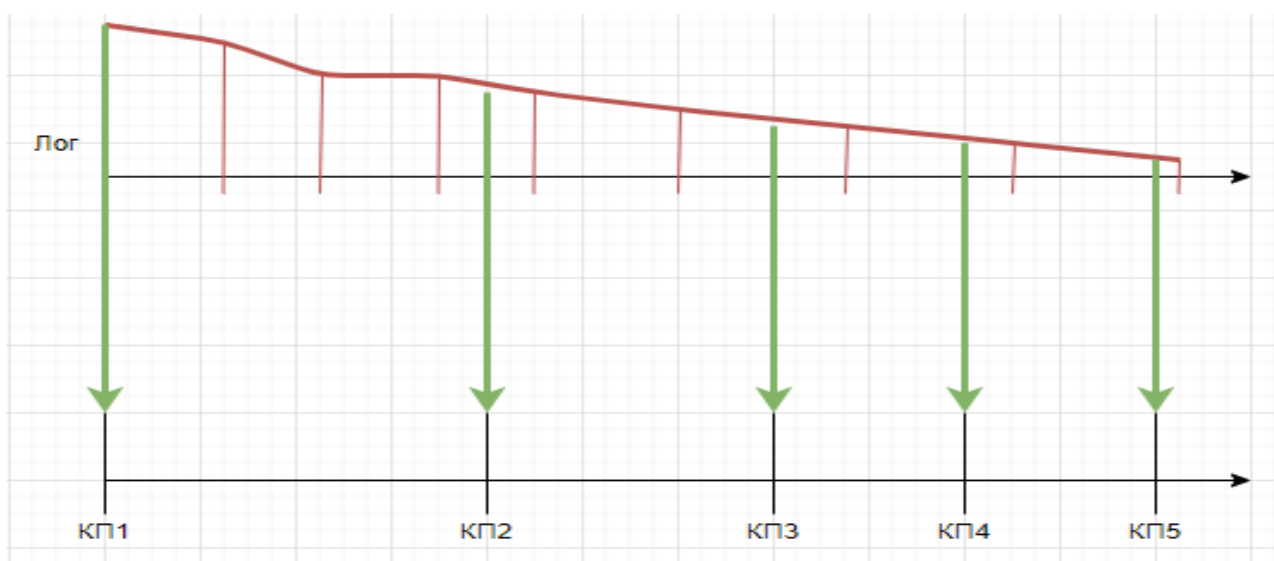


Рис. 4. Принцип работы с графической частью расчетного модуля (шаг 4)



Для получения визуальных данных изменения температуры нефти по длине магистрального нефтепровода, он проецируется его на продольный профиль с нанесенными контрольными пунктами (рис. 5).

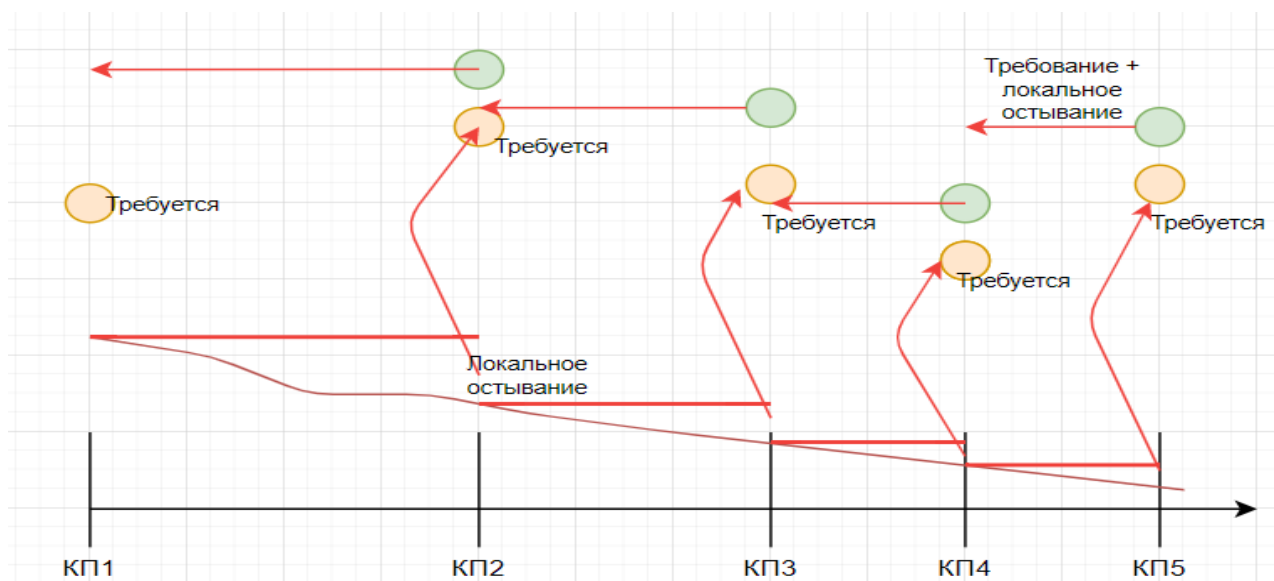


Рис. 5. Принцип работы с графической частью расчетного модуля (шаг 5)

В целях оптимизации выполнения расчетов при формировании технологических режимов перекачки разработан программный модуль, позволяющий рассчитывать температурное распределение вдоль исследуемого трубопровода в зависимости от параметров потока и окружающей среды. А также получить требуемую температуру на путевых пунктах подогрева нефти для обеспечения температуры нефти в конце технологического участка.

Программа реализована в виде консольного приложения Windows (рис. 6). Для работы приложения необходимо запустить терминал командной строки и выполнять все действия в нем. Для работы модуля необходимо подготовить файл с входными данными. Формат файла – xlsx (рис. 7). Для выполнения расчета нужно запустить программу с соответствующими параметрами: pipeline --mode=режим --file=файл --out=выходной\_файл.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Users\djerom>cd D:\dev\my\git\tube-temperature-simulator
C:\Users\djerom>d:
D:\dev\my\git\tube-temperature-simulator>pipeline -h
Usage: index.js [options] [command]

Commands:
  help    Display help
  version Display version

Options:
  -f, --file          файл с исходными данными
  -h, --help          Output usage information
  -m, --mode          Режим расчета (sf, sb, df, db, web) (defaults to "")
  -o, --out           файл с результатом
  -p, --port [value] Порт на котором будет работать приложение в режиме web (
defaults to "21000")
  -s, --step [value] Шаг дискретизации динамической модели (мин) (defaults to
"1")
  -v, --version       Output the version number

D:\dev\my\git\tube-temperature-simulator>
```

Рис. 6. Диалоговое окно параметров запуска программного модуля



A	B	C	D	E	F	G	H	I
#	Пункт	Расстояние(км)	D(мм)	dtl	Es	TNs	Qs(м3/ч)	ППН
0	ГНПС-1	0	820	3,27	-29	42	944,56	1
1	КП-2	9,3	820	4,89	-29	42	944,56	
2	КП-3	19,8	820	2,4	-29	42	944,56	
3	КП-4	34,1	820	0,58	-29	42	944,56	
4	КП-5	46,2	820	0,74	-29	42	944,56	
5	КП-6	47,7	820	1,29	-29	42	944,56	
6	КП-8	63	820	3,43	-29	42	944,56	
7	КП-9	89,5	820	5,19	-29	42	944,56	
8	ППН-89 вых	89,8	820	0,46	-29	42	944,56	1
9	КП-13	124,6	820	3,98	-29	42	944,56	
10	КП-14	138,5	820	-2,64	-29	42	944,56	
11	НПС-2 вых	153,4	1020	2,74	-29	42	1312,8	
12	КП-17	168,4	1020	0,04	-29	42	1312,8	
13	КП-18	182,8	1020	1,6	-29	42	1312,8	
14	КП-19	195,5	1020	1,39	-29	42	1312,8	
15	КП-20	209,2	1020	15,13	-29	42	1312,8	
16	ППН-221 вых	221,1	1020	0,84	-29	42	1312,8	1
17	КП-22	235,5	1020	0,28	-29	42	1312,8	
18	КП-23	249,4	1020	10,74	-29	42	1312,8	
19	ППН-283 вых	283,3	1020	-0,53	-29	42	1312,8	1
20	КП-27	296,9	1020	0,68	-29	42	1312,8	
21	КП-28	311,7	1020	0,17	-29	42	1312,8	
22	КП-29	321,1	1020	0,96	-29	42	1312,8	
23	КП-30	324,7	1020	0,11	-29	42	1312,8	

Рис. 7. Подготовка исходных данных. Пример исходного файла

Состав выходного файла зависит от типа задачи. Для прямых задач результатом будет распределение температуры по трубопроводу.

Для обратных задач результатом будет требуемая температура нефти на ППН.

Все отчеты хранятся в папке reports рядом с запущенным приложением. Папка создается автоматически при старте приложения. Сформированные отчеты доступны после запуска приложения до их удаления через систему или из папки reports.

Эффективность работы приведенного расчетного модуля доказана промышленным экспериментом, проведенным на действующем магистральном нефтепроводе комбинированного способа прокладки. Результаты отражены в Акте проведения промышленного эксперимента, а также работах [10,11].

*Список литературы:*

1. Бабичева Е.Б., Земенков Ю.Д., Бабичев Д.А., Щербанюк С.С. Прогнозирование и регулирование тепловых режимов работы магистральных нефтепроводов в условиях Заполярья / Бабичева Е.Б., Земенков Ю.Д., Бабичев Д.А., Щербанюк С.С. – Текст: непосредственный // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. №3-4 – с. 21-25 – Текст: непосредственный



2. Бабичева Е.Б., Земенков Ю.Д., Бабичев Д.А., Щербанюк С.С. Математическое моделирование интенсивности снижения температуры нефти в процессе перекачки с предварительным подогревом в условиях Заполярья / Бабичева Е.Б., Земенков Ю.Д., Бабичев Д.А., Щербанюк С.С. – Текст: непосредственный // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. №5-6 – с. 68-74 – Текст: непосредственный

3. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. К вопросу оперативного регулирования режимов работы тепловых сетей нефтеперекачивающих станций Заполярья / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Нефтегазовый терминал. Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень, 2021. – с. 145 – 148 – Текст: непосредственный

4. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. Оптимизация температурных режимов «горячей» перекачки нефти в условиях Заполярья / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Нефтегазовый терминал. Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень, 2021. – с. 29-33. – Текст: непосредственный

5. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. К вопросу определения оптимальных тепловых режимов магистральных нефтепроводов Заполярья / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Нефтегазовый терминал. Материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень, 2021. – с. 52-57. – Текст: непосредственный

6. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. О результатах моделирования процессов теплоотдачи при «горячей» перекачке нефти в условиях Заполярья / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Проблемы функционирования систем транспорта. Материалы Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. 2022. – с. 14-17. – Текст: непосредственный

7. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. Анализ эффективности математического моделирования для снижения энергозатрат на транспортировку высоковязких и высокозастывающих нефтей по нефтепроводу комбинированного способа прокладки / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Нефтегазовый терминал. Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень, 2022. – с. 156 – 160 – Текст: непосредственный

8. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. Исходные данные для моделирования интенсивности теплоотдачи при транспортировке нефти по магистральному нефтепроводу надземного способа прокладки / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Транспортные и транспортно-технологические системы. Сборник материалов международной научно-технической конференции. Тюмень, 2022. – с. 38 – 41 – Текст: непосредственный

9. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. Вариант моделирования тепловых потерь перекачиваемой среды при транспортировке высоковязкой и высокозастывающей нефти по нефтепроводу комбинированного способа прокладки / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Транспортные и транспортно-технологические системы. Сборник материалов международной научно-технической конференции. Тюмень, 2022. – с. 42 – 45 – Текст: непосредственный

10. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. Реализация результатов моделирования процессов теплоотдачи при осуществлении технологических операций на «горячем» магистральном нефтепроводе комбинированного способа прокладки / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Рассохинские чтения. Сборник материалов международной конференции. Ухта, 2023. – с. 386 – 373 – Текст: непосредственный

11. Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. Результаты полевых испытаний программного модуля для решения задач корректировки и прогнозирования тепловых режимов «горячих» нефтепроводов Заполярья / Бабичева Е.Б., Бабичев Д.А. – Текст: непосредственный // Нефтегазовый терминал. Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень, 2023. – с. 107 – 110 – Текст: непосредственный

