

УДК 622.692.2; 53.072.2

**РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПО ДЛИНЕ
НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА
И В ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ, МОДЕЛИРУЮЩЕМ РЕАЛЬНЫЙ
ТРУБОПРОВОД**

**CALCULATION OF THERMAL AND HYDRAULIC LOSSES ON
LENGTH OF NONISOTHERMAL MAIN OIL PIPELINE AND
LABORATORY BENCH OF MODEL REAL OIL PIPELINE**

**Некучаев В. О., Кырнышева П. А., Костерин К. С., Чупров И.Ф.
ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический
университет», г. Ухта, Российская Федерация**

**V. O. Nekuchaev, P. A. Kyrnysheva, K. S. Kosterin, I. F. Chuprov
FSBEI NPE “Ukhta State Technical University”
Ukhta, the Russian Federation
e-mail:vnekuchaev@ugtu.net**

Аннотация. Важную роль для выбора экономически оптимальных и безопасных режимов транспортировки нефти по магистральным трубопроводам играют теплогидравлические расчеты технологических режимов перекачки. Особенно это касается неизотермических трубопроводов и нефтей со сложной реологией. Актуальной задачей является апробация методов улучшения реологических характеристик высоковязких и высокозастывающих нефтей с помощью физико-химических воздействий. В настоящей работе сделана попытка применить для расчета потерь напора на трение и падения температуры в неизотермическом магистральном трубопроводе программный комплекс Schlumberger PIPESIM. В качестве примера был выбран магистральный трубопровод АО «Транснефть-Север» «Уса-Ухта». Показано, что такой

комплекс может быть использован для оценки тепловых и гидравлических потерь на реальном трубопроводе, хотя для достижения удовлетворительного согласия расчетных и фактических данных требуются дальнейшие исследования.

В работе также проведены расчеты гидравлических потерь на трение и потерь на местные сопротивления при течении нефти по лабораторному трубному стенду, который создается в Ухтинском государственном техническом университете для исследования влияния физических полей и химических реагентов на реологические свойства высоковязких и высокозастывающих нефтей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. На данном трубном стенде предполагается осуществление поточной обработки нефти аппаратами ультразвукового и магнитного воздействия, добавление депрессорных присадок, создание с помощью термостатов необходимых перепадов температур между внешней средой и трубопроводом.

Abstract. Thermal-hydraulic calculations of technological modes of pumping play an important role in the selection of economically optimal and safe modes of oil transportation through main pipelines. This is especially true for non-isothermal pipelines and abnormal oil of complex rheology. Urgent task is testing methods of improving of high-paraffinic and high viscosity oil rheological properties by physical-chemical influences. In this paper an attempt is made to apply software package Schlumberger PIPESIM to calculate the friction loss and temperature drop in non-isothermal main pipeline. As an example, the main pipeline "Transneft-North" "Usa-Ukhta" was chosen. It is shown that such a complex can be used to evaluate the thermal and hydraulic losses on the real line, although further investigation are required in order to achieve a satisfactory agreement between the calculated and actual data.

In the paper the hydraulic friction losses and losses on the local resistance in the flow of oil through the tube laboratory bench are also calculated. This lab scale tubing installation was created in Ukhta State Technical University to

investigate the influence of physical fields and chemical agents on the rheological properties of high-viscosity and high-paraffinic oils of Timan-Pechora oil-gas province. It is supposed to treat of oil pipe flow by ultrasound and magnetic fields, adding depressants, and by thermal heating.

Ключевые слова: тепловые и гидравлические расчеты, потери на трение, магистральный трубопровод, высоковязкие нефти, лабораторный стенд, моделирование.

Key words: thermal and hydraulic calculations, friction loss, the main pipeline, high-viscosity oil, laboratory bench, pipe flow, simulation.

Для эффективного планирования режимов транспортирования нефти по магистральному нефтепроводу необходимо проводить тепловой и гидравлический расчеты режимов работы МН и выбор наиболее оптимального из них [1,2].

При перекачке аномальных нефтей, обладающих сложными реологическими свойствами, часто используются специальные методы, улучшающие транспортабельные свойства нефти (горячая перекачка, термообработка, введение депрессорных присадок, обработка физическими полями и пр.). Апробация этих методов и поиск оптимальных режимов их применения непосредственно на реальном трубопроводе чаще всего невозможна. Поэтому актуальной задачей является разработка лабораторного стенда, моделирующего реальный трубопровод и расчет параметров его работы при перекачке аномальных нефтей со сложным реологическим поведением.

Целью данной работы является расчет тепловых и гидравлических потерь по длине МН «Уса-Ухта», а также гидравлических потерь в лабораторном стенде, моделирующем процессы, происходящие в магистральном трубопроводе при неизотермическом течении жидкости.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1) собрать необходимые данные для компьютерного моделирования режимов работы неизотермического магистрального трубопровода с помощью программного комплекса Schlumberger PIPESIM;

2) провести расчет изменения температуры нефти и давления по длине магистрального трубопровода и сравнить результаты расчетов с фактическими данными на примере МН «Уса-Ухта»;

3) рассчитать гидравлические потери, в том числе потери на местные сопротивления, при прокачке Усинской нефти по лабораторному стенду и выбрать основные технические параметры стенда: мощность и напор насоса, диаметр труб, скорость потока, расход и пр.

Для расчетов параметров режимов транспортировки нефти был выбран программный комплекс Schlumberger PIPESIM, применяемый для анализа систем добычи и транспорта продукции. PIPESIM позволяет моделировать состав и свойства потоков, производить расчет гидравлических потерь, прогнозировать образование коррозии, определять толщину отложений парафина и др. [3].

Для проверки возможностей программы PIPESIM был выбран магистральный нефтепровод «Уса-Ухта». В данной программе был проведен расчет тепловых и гидравлических потерь по длине этого трубопровода с учетом предварительного подогрева на НПС «Уса» и «Чикшино».

Исходные данные для расчетов, такие как техническая характеристика трубопровода; свойства перекачиваемой нефти; условия внешней среды; давления на выходе из НПС, были представлены товарно-транспортным отделом АО «Транснефть-Север» в рамках договора о сотрудничестве между ФБГОУ ВПО УГТУ и АО «Транснефть-Север».

На рисунке 1 представлена визуализация модели магистрального трубопровода.

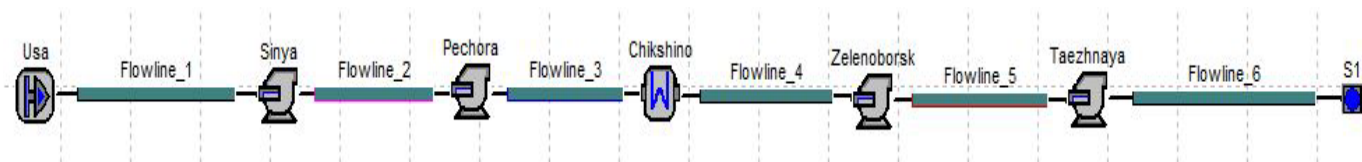


Рисунок 1. Визуализация МН «Уса-Ухта»
в программном комплексе PIPESIM

В результате обработки исходных данных и проведения расчетов были получены распределения давления и температуры по длине трубопровода. Результаты представлены на рисунках 2 и 3.

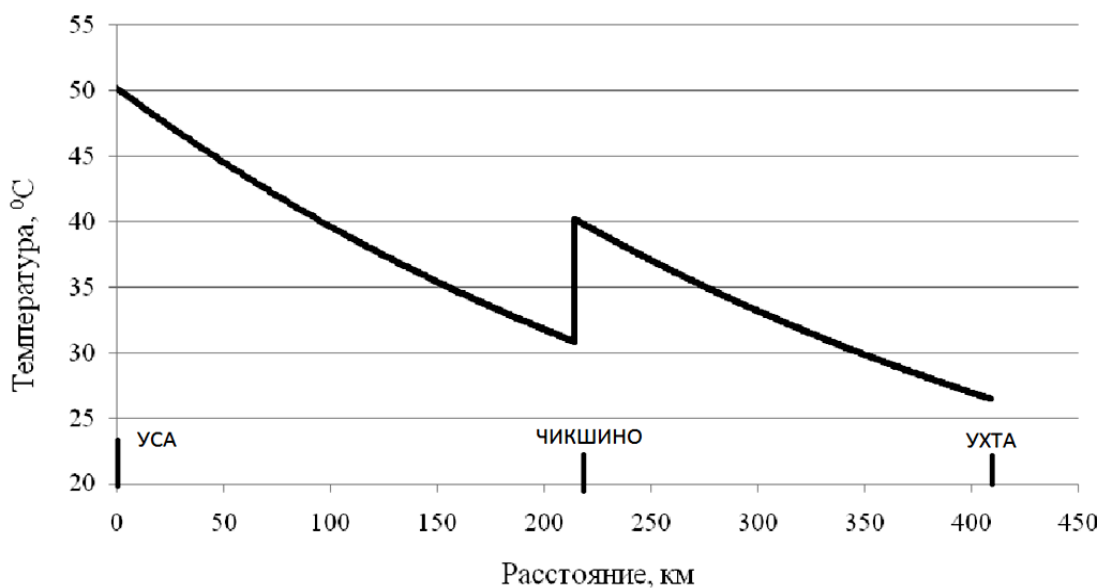


Рисунок 2. Распределение температуры по длине МН «Уса-Ухта»

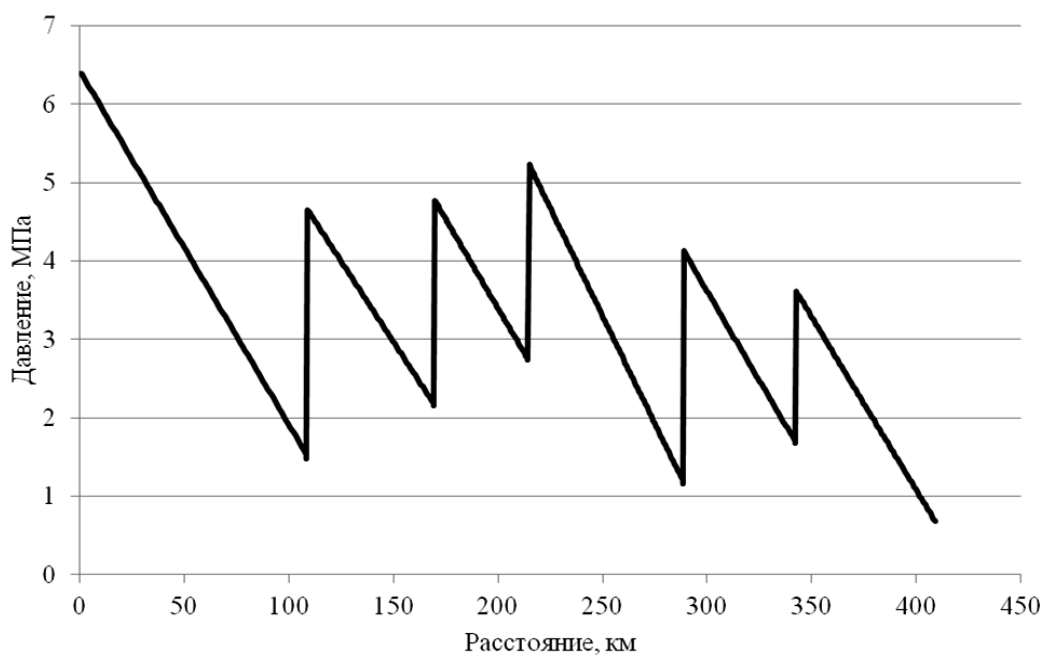


Рисунок 3. Распределение давления по длине МН «Уса-Ухта»

Для проверки адекватности модели было произведено сравнение расчетных значений температуры и давления с фактическими данными (рисунки 4 и 5).

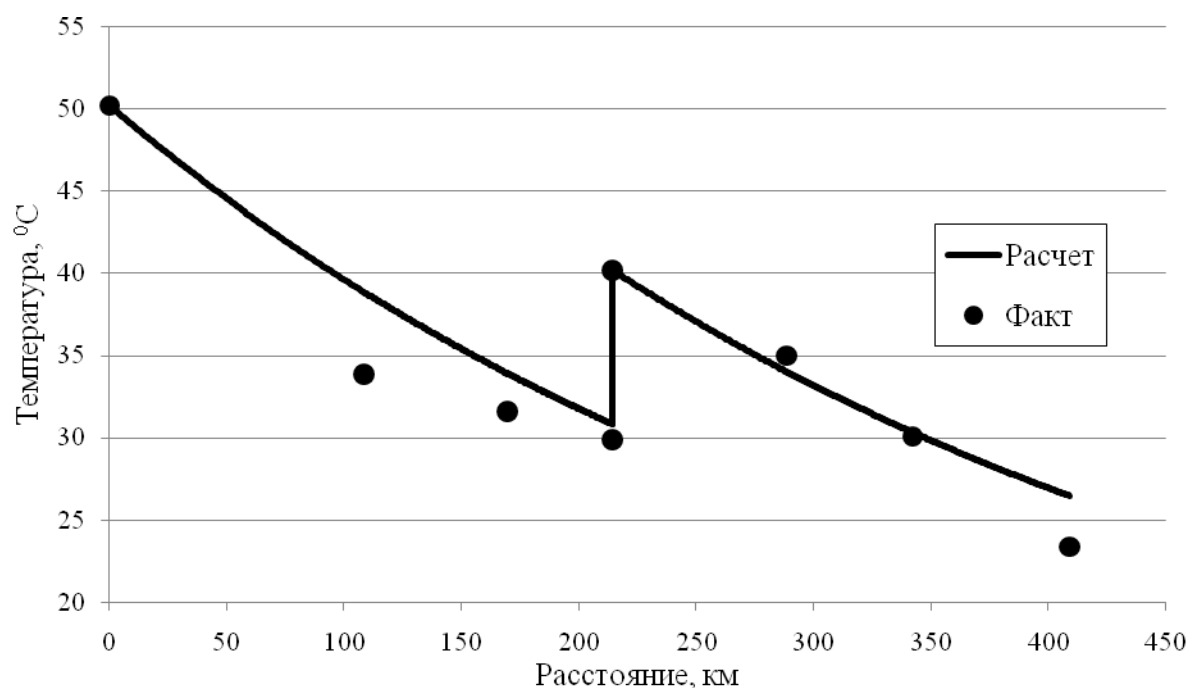


Рисунок 4. Сравнение расчетных и фактических значений температуры

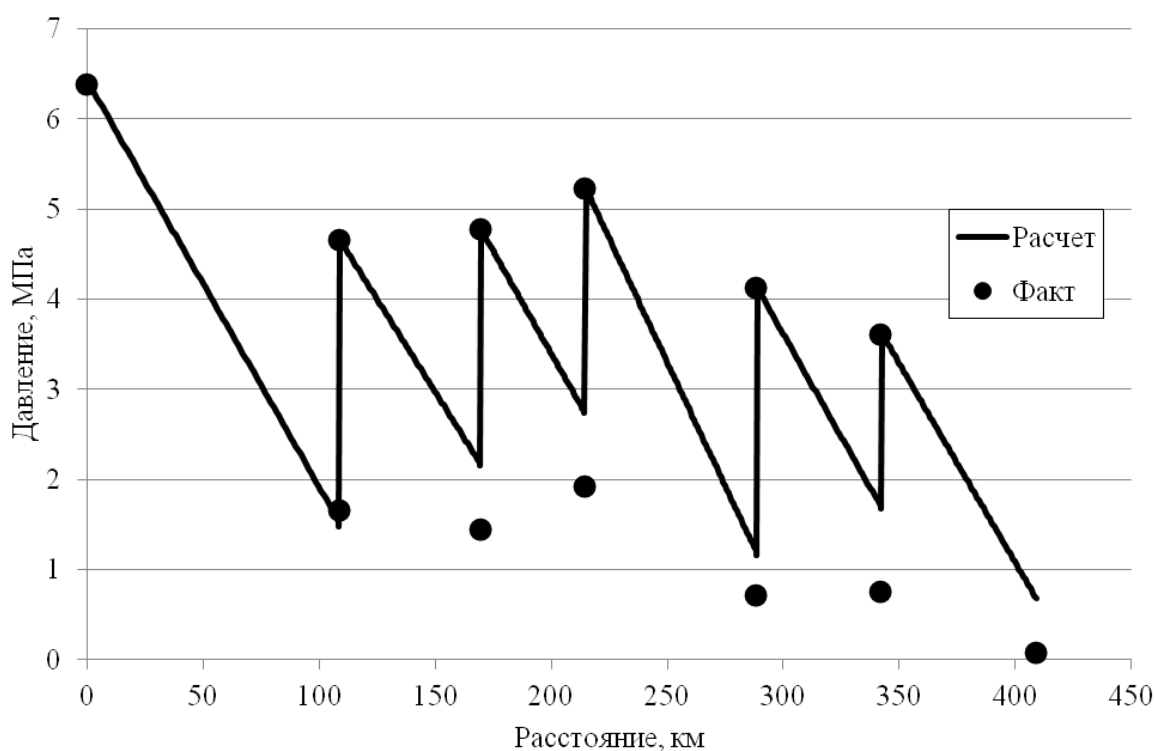


Рисунок 5. Сравнение расчетных и фактических значений давления

На рисунках 4 и 5 видно, что фактические значения параметров отличаются от расчетных, особенно это заметно для давления. Значения давления на выходе из НПС («верхние» точки) задаются непосредственно пользователем программы, поэтому расчетные значения полностью совпадают с фактическими на выходе из НПС. Сравнивать с экспериментом следует значения давления на входе в НПС («нижние» точки), так как именно они отражают адекватность модели.

Отклонения фактических значений от расчетных, могут объясняться недостатком необходимой для моделирования информации, сезонными и погодными изменениями температуры окружающей среды, отложениями парафина, изменением свойств и объема перекачиваемой жидкости.

В целом, можно сказать, что построенная компьютерная модель отражает реальные параметры МН «Уса-Ухта» и ее можно будет использовать для оценки изменения режимов перекачки из-за изменения свойств транспортируемой нефти в результате обработки физическими полями или химическими реагентами.

Изучение подобных изменений будет возможно в созданной в УГТУ реологической лаборатории изучения влияния физических полей и химических реагентов на свойства перекачиваемой нефти.

Специально для решения этих задач создается лабораторный стенд, представляющий собой физическую модель нефтепровода. На данной установке предполагается осуществление поточной обработки нефти аппаратами ультразвукового и магнитного воздействия, доступен ввод присадок в поток жидкости, создание с помощью термостатов необходимых перепадов температур между внешней средой и трубопроводом. Результаты изменений реологии течения неньютоновских нефтей под действием различных факторов, полученные на стенде, будут сравниваться с результатами, полученными на ротационных вискозиметрах [4]. На рисунке 6 приведена схема стенда.

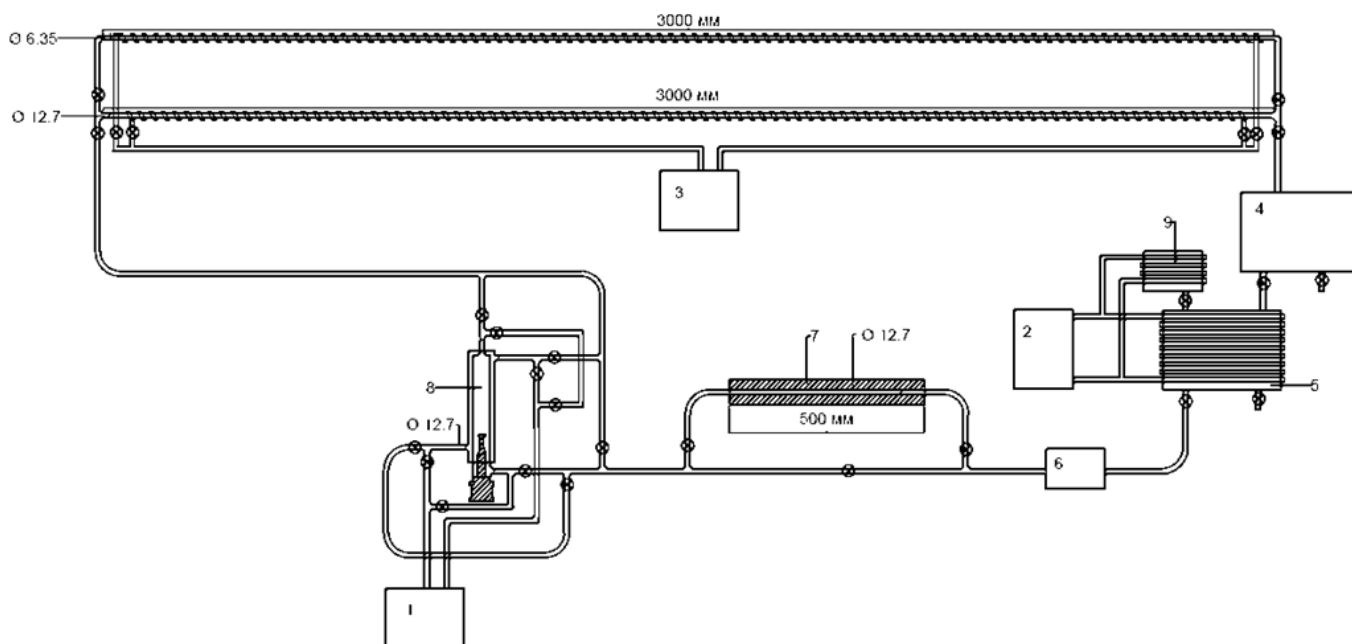


Рисунок 6. Модель станда:

1,2,3 – программируемые термостаты; 4,5 – резервуары для нефти;
6 – насос; 7 – магнитные активаторы в защитном кожухе;
8 – ультразвуковой технологический аппарат «Поток»; 9 – блок ввода присадок

Специально для данного станда ООО «Центр УЗ технологий» (г.Бийск) по заказу УГТУ разработал схему ультразвукового технологического аппарата «Поток»[5] (рисунок 7). Аппарат состоит из ультразвуковой колебательной системы с заменяемым рабочим инструментом и технологических объемов.

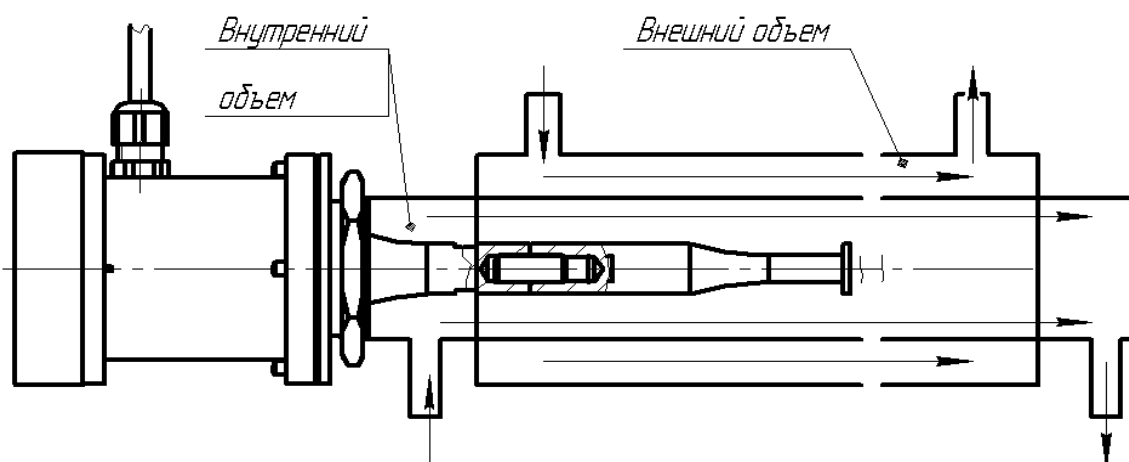


Рисунок 7. Аппарат для проточной обработки жидкости ультразвуком

В такой конструкции проточного ультразвукового аппарата заложено два способа воздействия:

1. Обработка жидкости во внутреннем объеме высокоинтенсивным ультразвуковым излучением, при помощи внешнего объема можно организовать требуемый температурный режим, пропуская холодную или горячую жидкость;

2. Обработка нефти во внешнем объеме широкополосным спектром колебаний, возникающих в результате кавитации жидкости, протекающей в то же время во внутреннем объеме, и передающихся через стенку.

Для обработки нефти магнитным полем по заказу УГТУ в ООО «ПОЗ-Прогресс» были изготовлены магнитные аппараты на основе неодимовых магнитов. Аппараты представляют собой трубу из немагнитного материала, на которой размещены постоянные магниты. Интенсивность магнитной обработки варьируется путем смены магнитов с различной величиной магнитной индукции, расстоянием между магнитами, изменением направления полюсов магнитов.

Для подбора необходимого насосного оборудования для стенда был проведен оценочный расчет гидравлических потерь.

Полные потери напора складываются из потерь на трение по длине трубопровода и потерь на местные сопротивления (они обусловлены изменением значения и направления скорости жидкости, вызванное сужениями, поворотами, задвижками и др.) [6].

$$h = h_{\tau} + h_m,$$

Потери напора на трение рассчитывают по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_{\tau} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2g},$$

где u – средняя по сечению скорость движения жидкости, м/с;
 d – внутренний диаметр трубопровода, м; L – длина трубопровода, м;
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Потери напора на преодоление местных сопротивлений рассчитывают по формуле:

$$h_m = \sum_j \zeta_j \frac{u^2}{2g},$$

в которой ζ_j – коэффициенты местных сопротивлений, а суммирование осуществляется по всем сопротивлениям, имеющимся на участке.

При больших длинах трубопроводов потери на местные сопротивления составляют около 2% от общих потерь [7], поэтому, как правило, их не учитывают. Однако, так как общая длина труб стенда невелика потери на местное сопротивление могут внести существенный вклад в общие потери напора.

Для проведения расчета были приняты следующие исходные данные:

- плотность нефти $\rho_{ж} = 860 \text{ кг/м}^3$
- динамическая вязкость $\mu_1 = 10 \text{ мПа}\cdot\text{с}$; $\mu_2 = 50 \text{ мПа}\cdot\text{с}$; $\mu_3 = 200 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Расчеты были проведены для трех значений скоростей перекачки: 0,5 м/с; 0,1 м/с; 0,01 м/с и диаметре основной трубы, равном 1/2 дюйма.

По формуле, связывающей скорость и производительность, видно, что для данных скоростей, производительность составит 0,04; 0,42 и 2,10 л/мин соответственно.

Результаты расчета общих потерь напора, выраженных в метрах, и потерь давления (кПа) приведены в таблицах 1 и 2 для значений вязкости 10, 50, 200 мПа·с.

Первый вариант представляет работу стенда без магнитной и ультразвуковой обработки, второй – работа с УЗ обработкой; третий вариант – работа с магнитной обработкой; четвертый вариант – работа и с УЗ, и с магнитной обработкой.

Таблица 1. Потери напора при движении жидкости

Вариант	Потери напора, м			
	1	2	3	4
Вязкость 10 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	6	6	6	6
$v = 0,1$ м/с	6,6	6,6	6,65	6,66
$v = 0,5$ м/с	9,8	9,9	9,9	10
Вязкость 50 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	6,3	6,3	6,3	6,3
$v = 0,1$ м/с	9,5	9,4	9,5	9,4
$v = 0,5$ м/с	23,9	23,7	24	23,8
Вязкость 200 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	7,3	7,3	7,3	7,3
$v = 0,1$ м/с	20	19,7	20	19,7
$v = 0,5$ м/с	77	75	76	75

Таблица 2. Потери давления при движении жидкости

Вариант	Потери давления, кПа			
	1	2	3	4
Вязкость 10 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	51	51	51	51
$v = 0,1$ м/с	56	56	56	56
$v = 0,5$ м/с	83	84	84	85
Вязкость 50 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	53	53	53	53
$v = 0,1$ м/с	80	79	80	79
$v = 0,5$ м/с	202	200	203	201
Вязкость 200 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	62	62	62	62
$v = 0,1$ м/с	169	166	169	166
$v = 0,5$ м/с	648	635	649	636

Номера столбцов соответствуют различным вариантам движения жидкости в стенде. Для каждого варианта число элементов, создающих потери на местное сопротивление и совокупная длина пути могут быть различными.

В таблице 3 представлена доля потерь напора (давления) на местное сопротивление от общих потерь.

Таблица 3. Доля местных потерь напора (давления) от общих потерь

Вариант	Доля местных потерь, %			
	1	2	3	4
Вязкость 10 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	0,21	0,26	0,26	0,31
$v = 0,1$ м/с	2,05	3,06	2,57	3,57
$v = 0,5$ м/с	9,49	13,82	11,66	15,83
Вязкость 50 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	0,04	0,06	0,05	0,07
$v = 0,1$ м/с	0,42	0,64	0,52	0,75
$v = 0,5$ м/с	2,05	3,12	2,57	3,64
Вязкость 200 мПа·с				
$v = 0,01$ м/с	0,010	0,016	0,013	0,019
$v = 0,1$ м/с	0,105	0,161	0,132	0,188
$v = 0,5$ м/с	0,521	0,799	0,655	0,935

Из таблицы 3 видно, что с возрастанием вязкости жидкости при заданной скорости течения доля потерь на местное сопротивление уменьшается. Для данной вязкости доля потерь на местное сопротивление с ростом скорости течения увеличивается, что соответствует формулам 2 и 3.

На рисунках 8, 9, 10 показаны зависимости полных потерь давления от вязкости перекачиваемой нефти при различных скоростях потока.

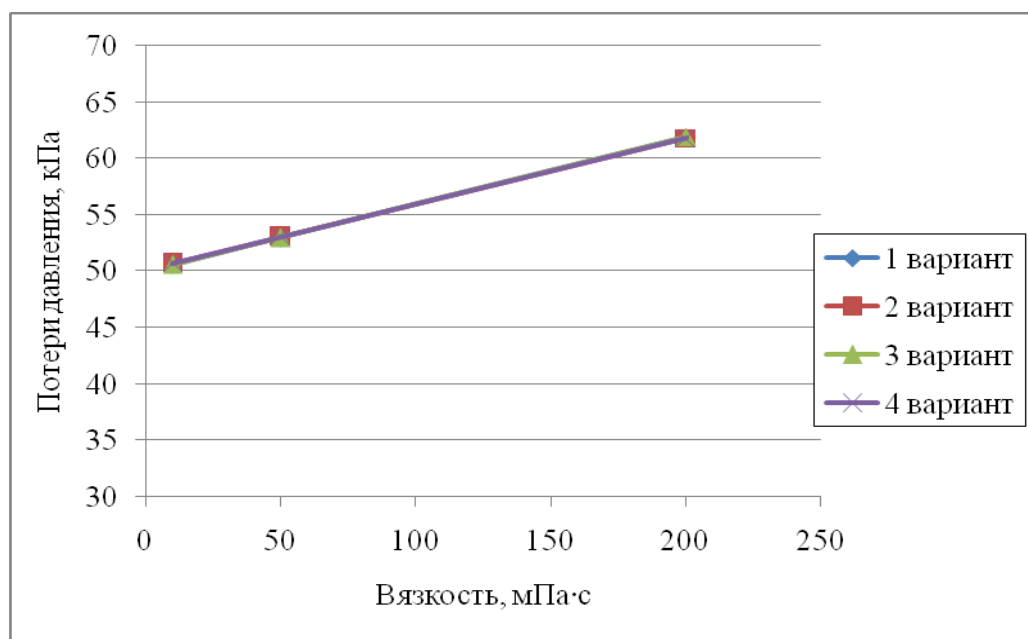


Рисунок 8. Зависимость полных потерь давления от вязкости при $v = 0,01$ м/с

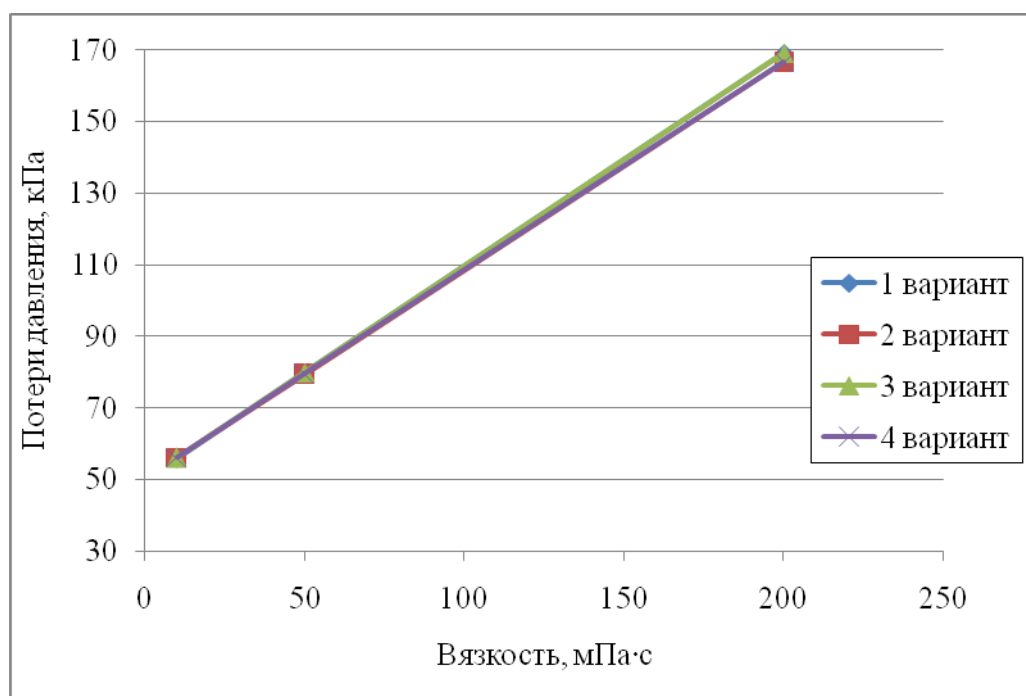


Рисунок 9. Зависимость полных потерь давления от вязкости при $v = 0,1$ м/с

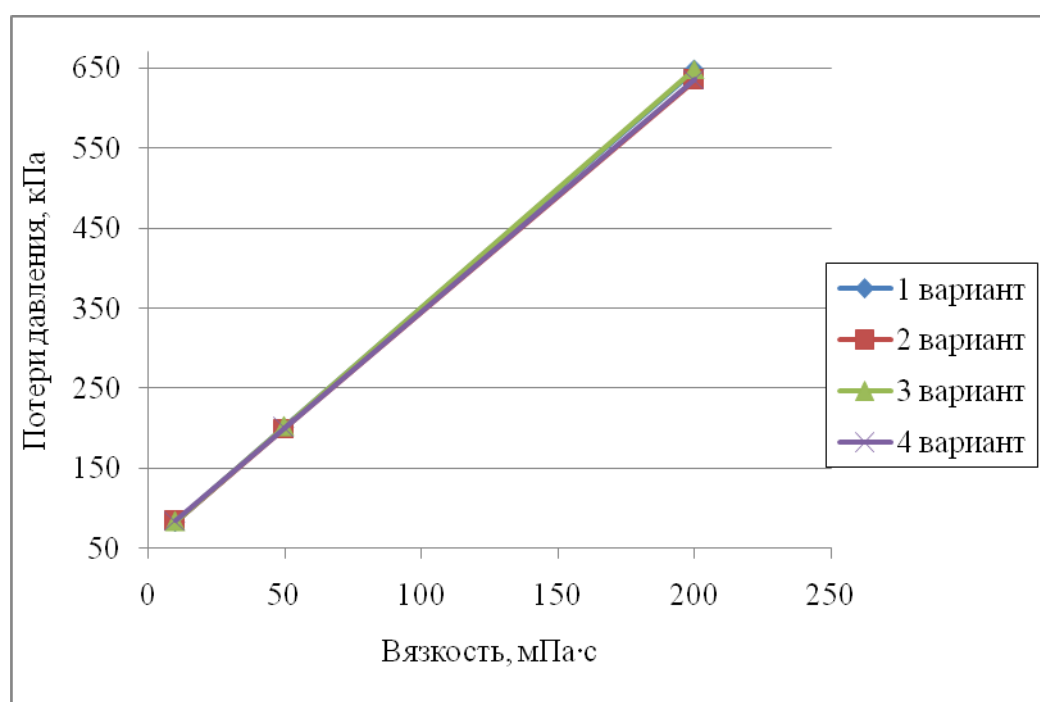


Рисунок 10. Зависимость полных потерь давления от вязкости при $v = 0,5$ м/с

Выводы

1. Первый опыт применения программного комплекса Schlumberger PIPESIM для расчета теплогидравлических потерь по длине магистрального трубопровода на примере МН АО «Транснефть-Север» «Уса-Ухта» показал, что могут получаться разумные результаты, однако расхождения с фактическими данными достаточно заметны. Для выяснения причин отклонений требуются дальнейшие расчеты.

2. Для исследования влияния физических полей и химических реагентов на транспортабельные свойства аномальных нефтей целесообразно создать лабораторный трубный стенд с возможными диаметрами труб $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ дюйма и длиной прямолинейного участка порядка 3 м. Для преодоления потерь напора на трение и на местных сопротивлениях в этом стенде, в том числе на магнитных и УЗ аппаратах, подходят насосы с напором до 2 МПа и производительностью до $0,9 \text{ м}^3/\text{час}$. Например, при вязкости исследуемых нефтей до $100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ и скоростью потока до $0,5 \text{ м/с}$ подходит шестеренчатый насос VariscoV12 с производительностью $0,7 \text{ м}^3/\text{час}$ и давлением до $0,6 \text{ МПа}$. При больших вязкостях или больших скоростях требуется насос с более мощными характеристиками.

Список используемых источников

1 Трубопроводный транспорт нефти и газа: учебник для ВУЗов, 2-е изд., перераб. и доп. / Алиев Р. А.[и др.] М.: Недра, 1988. 368 с.

2 Федоров П. В. Совершенствование методов планирования технологических режимов и контроля процесса транспортировки нефти по магистральным нефтепроводам: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19. Ухта, 2011. 130 с.

3 Schlumberger PIPESIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sis.slb.ru/pipesim/> (дата обращения 18.11.14).

4 Некучаев В. О., Васенева А. А. Особенности реологических кривых течения высоковязких нефтей и их водных эмульсий // Нефтяное хозяйство. 2013. № 8. С. 61-63.

5 Аппарат ультразвуковой проточной обработки / Хмелев В. Н. [и др.] Пат. 141803 РФ ООО "Центр ультразвуковых технологий". Заяв. 26.02.14; Опубл. 10.06.14. 2 с., ил.

6 Чугаев Р. Р. Гидравлика: учебник для ВУЗов. 4-е изд., доп. и перераб. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с., ил.

7 Васильев Г. Г. Трубопроводный транспорт нефти: Учеб.пособие. Под ред. С. М. Вайнштока. М.: Недра, 2002. Т. 1. 408 с., ил.

References

1 Truboprovodnyiy transport nefti i gaza: uchebnik dlya VUZov, 2-e izd., pererab. i dop. / Aliev R. A. [i dr.] M.: Nedra, 1988. 368 s. [in Russian].

2 Fedorov P. V. Sovershenstvovanie metodov planirovaniya tehnologicheskikh rezhimov i kontrolya protsessa transportirovki nefti po magistralnyim nefteprovodam: dis. ... kand. tehn. nauk: 25.00.19. Uhta, 2011. 130 s. [in Russian].

3 Schumberger PIPESIM [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.sis.slb.ru/pipesim/> (data obrascheniya 18.11.14). [in Russian].

4 Nekuchaev V. O., Vaseneva A. A. Osobennosti reologicheskikh krivyyih techeniya vyisokovyazkikh neftey i ih vodnyih emulsiy // Neftyanoie hozyaystvo. 2013. № 8. S. 61-63. [in Russian].

5 Apparat ultrazvukovoy protochnoy obrabotki / Hmelev V. N. [i dr.] Pat. 141803 RF ООО "Tsentr ultrazvukovyih tehnologiy". Zayav. 26.02.14; Opubl. 10.06.14. 2 s., il. [in Russian].

6 Chugaev R. R. Gidravlika: uchebnik dlya VUZov. 4-e izd., dop. i pererab. L.: Energoizdat, 1982. 672 s., il. [in Russian].

7 Vasilev G. G. Truboprovodnyiy transport nefti: Ucheb.posobie. Pod red. S. M. Vaynshtoka. M.: Nedra, 2002. T. 1. 408 s., il. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Некучаев В. О., д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой физики, ФГБОУ ВПО УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

V. O. Nekuchaev, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Head of the Chair "Physics", FSBEI HPE Ukhta State Technical University, Ukhta, the Russian Federation

e-mail: vnekuchaev@ugtu.net

Кырнышева П. А., бакалавр, ФГБОУ ВПО УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

P. A. Kurnysheva, bachelor, FSBEI HPE Ukhta State Technical University, Ukhta, the Russian Federation

Костерин К. С., аспирант, ФГБОУ ВПО УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

K. S. Kosterin, Post-graduate Student of FSBEI HPE Ukhta State Technical University, Ukhta, the Russian Federation

Чупров И. Ф., д-р техн. наук, профессор кафедры высшей математики, ФГБОУ ВПО УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

I. F. Chuprov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, of the Chair Mathematics, FSBEI HPE Ukhta State Technical University, Ukhta, the Russian Federation