

03;08

Снижение статического предела текучести охлажденной до -15°C тяжелой фракции нефти под действием сдвиговых ультразвуковых колебаний

© В.И. Коренбаум, А.А. Тагильцев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДО РАН,
Владивосток

E-mail: v-kor@poi.dvo.ru

В окончательной редакции 28 августа 2009 г.

На модельной лабораторной установке экспериментально выявлен эффект вызванного сдвиговыми ультразвуковыми колебаниями частоты 25 kHz статически достоверного снижения нормированного на исходную температуру статического предела текучести тяжелой фракции нефти в пристеночном слое при температурах в диапазоне от -13 до -17.5°C . Определена величина эффекта, которая при удельной акустической мощности ультразвуковых колебаний порядка 0.002 W/cm^2 составила около 19%.

Транспортировка тяжелой фракции нефти (ТФН) производится в технологических трубопроводах нефтебаз и теплоэлектростанций. Проблемой является недостаточная текучесть ТФН при пониженных температурах окружающей среды, когда она становится желеобразной. Особые сложности возникают при стартовых режимах, когда ТФН, по крайней мере, в пристеночном слое трубы претерпевает переход из упругого состояния в текучее. Обычно для повышения текучести применяется разогрев паром. Однако данная технология весьма энергоемка, дорога и вследствие высоких теплоизоляционных свойств ТФН малоэффективна.

Изучению влияния механических колебаний на текучесть нефтепродуктов посвящено большое число работ (см., например, [1,2]). В частности, в статье [2] выявлено снижение гелеобразования при увеличении интенсивности ультразвуковых колебаний. В работе [3] показан эффект двукратного снижения сопротивления прокачивания нефти при температурах около -7°C в магистральных нефтепроводах с

помощью создания сдвиговых либо крутильных ультразвуковых колебаний в стенках труб. Таким образом, эффект акустического управления текучестью нефтепродуктов с температурой плавления до 29°С доказан экспериментально.

Целью данной работы являлось применение акустического метода к более тяжелым и соответственно менее текучим нефтепродуктам (температура плавления около 40°С) при более низких температурах окружающей среды.

Для проведения экспериментальных исследований разработана лабораторная установка [4]. Она содержит стакан–емкость для рабочей среды. На оси вращения внешнего штатива подвешен вращающийся акустический узел, содержащий стержневой пьезопреобразователь с приклеенным к его торцу металлическим патрубком. Пьезопреобразователь вместе с патрубком образуют 1/2-волновой излучатель системы возбуждения ультразвуковых колебаний. Стакан заполняется рабочей средой при комнатной температуре. Акустический узел фиксируется в емкости с рабочей средой при помощи вспомогательных креплений. Затем установка охлаждается до требуемой температуры. После извлечения из холодильника вращающаяся часть установки соединяется с осью вращения внешнего штатива, а вспомогательные крепления извлекаются. В боковую стенку подвеса акустического узла вворачивается рычаг, к которому на фиксированном расстоянии от оси вращения установки прикрепляется датчик силы. С генератора на пьезокерамический преобразователь в течение регулируемого времени подается электрический сигнал, что приводит к развитию в пристеночном слое патрубка сдвиговых колебаний рабочей среды. На рычаге через датчик силы создается усилие, при котором патрубок вместе со всем вращающимся акустическим узлом начинает проворачиваться в рабочей среде (в горизонтальной плоскости). Это усилие регистрируется датчиком силы.

Заметим, что схема установки основана на принципе обращения геометрии задачи о продвижении рабочей среды в трубе [3]. Действительно, критичным для снижения сопротивления прокачки нефтепродукта через трубопровод является увеличение текучести не в полном объеме рабочей среды, а только в ее пристеночном слое. Именно этот эффект и предполагается регистрировать по падению усилия смещения вращающегося патрубка.

Установка заполнена ТФН М-100 Белореченского завода. Охлаждение установки, заполненной ТФН, производилось в морозильной камере холодильника в течение не менее 4 h. Двусторонняя площадь погруженной в ТФН части вращающегося патрубка (внешний диаметр 25 mm, внутренний — 23 mm, глубина погружения 10 mm) составила $S = 9.06 \text{ cm}^2$.

Измерение усилия смещения патрубка производилось датчиком силы SBA-100L (CAS Corporation), подключаемым через мостовой усилитель к электронному самописцу PowerLab-8/30 (ADInstruments). Датчик силы в горизонтальном положении через тягу (леску), закрепленную на рычаге (плечо 28 mm относительно оси вращения системы), приводился в движение по направлению касательной к круговой траектории вращающегося узла установки после включения режима записи данных на электронный самописец. После смещения патрубка и начала его вращения усилие прекращалось. Для оценки усилия смещения использовалось максимальное значение силы ($F, \mu\text{V}$).

В качестве режимов воздействия использовались: отсутствие ультразвука (режим 0), 20-секундное воздействие ультразвука частотой 25 kHz с его выключением перед измерением усилия смещения (режим 1), 20-секундное воздействие ультразвука частотой 25 kHz без выключения в процессе измерения усилия смещения (режим 2).

Контролировались следующие параметры: температура мазута в объеме, измеряемая с помощью терморезистора Tv ($\text{k}\Omega$), температура патрубка лабораторной установки, погружаемого в мазут, измеряемая с помощью терморезистора Tt (Ω), температура мазута в объеме, измеряемая с помощью ртутного термометра Tv ($^\circ\text{C}$), ток потребления пьезопреобразователя (I, mA) и выходное напряжение генератора U (V). Вычислялись параметры усилия смещения, нормированного на исходные значения температуры: F/Tv ($\text{k}\Omega$), F/Tt (Ω), F/Tv ($^\circ\text{C}$).

Проведено 52 эксперимента при температурах в диапазоне от -13 до -17.5°C . С помощью критерия Шапиро–Вилка была проверена нормальность распределения всех вариантов для каждого из режимов. Полученные результаты для характеристик распределения усилия смещения, нормированного на исходную температуру в объеме среды, в зависимости от режима воздействия ультразвуковых колебаний представлены на рисунке. С использованием t -теста для выборок с отличающимися дисперсиями оценена статистическая значимость различий контролируемых параметров между режимами воздействия. Статистически

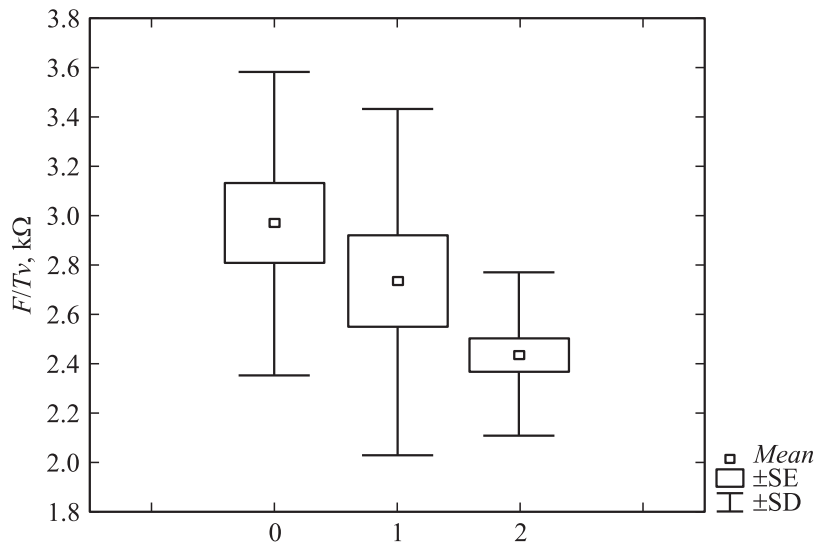


Диаграмма (Box and Whiskers) зависимости характеристик распределения параметра F/Tv ($k\Omega$) при различных режимах воздействия ультразвуковых колебаний: 0 — отсутствие ультразвука; 1 — 20-секундное воздействие ультразвука, с его выключением перед измерением усилия смещения; 2 — 20-секундное воздействие ультразвука без выключения в процессе измерения усилия смещения. Mean — среднее арифметическое значение, SE — ошибка среднего арифметического значения, SD — стандартная девиация (среднеквадратическое отклонение).

достоверная разница между контролируемыми параметрами выявлена только между режимами 0 и 2 (см. таблицу). Между режимами 0 и 1 по любому из контролируемых параметров достоверной разницы не обнаружено.

Измеряемое в эксперименте усилие смещения патрубка лабораторной установки F , очевидно, пропорционально величине статического предела текучести вязко-упругой среды и характеризует влияние ультразвуковых колебаний на переход ТФН из упругого в текучее состояние. Из результатов эксперимента (см. таблицу) следует, что стимулированное ультразвуковыми колебаниями снижение нормированного на исходную температуру статического предела текучести

Статистическая значимость (p) и величина прироста средних значений параметров между режимами 0 и 2

Параметр	Tv , к Ω	Tt , Ω	Tv , $^{\circ}\text{C}$	F , μV	F/Tv , к Ω	F/Tt , Ω	F/Tv , $^{\circ}\text{C}$
p	0.033	0.030	0.037	0.054	0.0083	0.0078	0.0053
Прирост, %	+5.3	+4.9	+6.8	-13.3	-18.8	-18.8	-19.3

охлажденной до -15°C ТФН в пристеночном слое вращающегося патрубка лабораторной установки достигает 19%.

На пьезопреобразователь установки в охлажденной ТФН подается активная электрическая мощность около 0.36 W ($U = 50\text{ V}$, $I = 40\text{ mA}$, $\cos \varphi = 0.18$). Тогда, с учетом 5% КПД пьезопреобразователя и погруженной площади S , удельная акустическая мощность, развиваемая установкой в охлажденной ТФН, может составлять примерно 0.002 W/cm². Тем не менее эффект снижения приведенного к исходной температуре статического предела текучести имеет место с высокой статистической достоверностью (см. таблицу).

Заметим, что этот эффект наблюдается только тогда, когда воздействие ультразвуковых колебаний сохраняется в процессе смещения патрубка (режим 2), и исчезает, если выключить генератор перед началом смещения (режим 1). Данное обстоятельство свидетельствует о быстрой обратимости (в пределах 1 s) вызванного ультразвуковыми колебаниями влияния. Отсюда следует, что вносимые ультразвуковыми колебаниями изменения среды носят минимальный характер. Это, в свою очередь, означает, что используемый режим возбуждения лежит вблизи нижнего порога реализации эффекта воздействия ультразвуковых колебаний для исследуемой ТФН при температурах около -15°C . Кроме того, это, вероятно, свидетельствует о том, что сам эффект достигается не за счет полного расплавления пристеночного слоя ТФН (тогда эффект сохранялся бы в течение более длительного времени), а за счет своеобразной колебательной микросмазки, вызванной, скорее всего, конформационной перестройкой хвостов длинных углеводородных молекул или их частичным отрывом [5].

Что касается переноса полученных модельных результатов на технологическую установку, то достигнутое почти 20%-ное снижение усилия смещения вращающегося патрубка в ТФН, вследствие обраще-

ния геометрии лабораторной установки, эквивалентно почти 20%-ному снижению сопротивления ТФН в пристеночном слое трубопровода при стартовом режиме. Этот эффект представляет практический интерес для снижения экстремальной нагрузки на насосы технологических трубопроводов в зимних стартовых режимах и продление таким образом срока их службы.

Итак, на модельной лабораторной установке впервые экспериментально выявлен эффект вызванного сдвиговыми ультразвуковыми колебаниями статистически достоверного снижения нормированного на исходную температуру статического предела текучести ТФН М-100 в пристеночном слое при температурах в диапазоне от -13 до -17.5°C . Определена величина эффекта, которая при удельной акустической мощности ультразвуковых колебаний порядка 0.002 W/cm^2 составила около 19%.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 06-08-96005-р_восток_a.

Список литературы

- [1] *Beresnev I.A., Johnson P.A.* // *Geophysics* 1994. V. 59. N 6. P. 1000–1017.
- [2] *Lionetto F., Coluccia G., D'Antona P., Maffezzoli A.* // *Rheologia acta*. 2007. V. 46. N 5. P. 601–609.
- [3] *Миронов М.А., Пирогов В.А., Туманян Б.П., Челинцев С.Н.* // *Химическая техника*. 2002. Т. 6. № 3. С. 38-42.
- [4] *Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Кирьянова Е.В.* // *Сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества*. М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 56–60.
- [5] *Granik S.* // *Physics Today*. 1999. July. P. 26–31.