

УДК 521.01.37

Изучение перспектив применения кавитационных технологий при трубопроводном транспорте

С.Т. Алиев

SOCAR Midstream Operations LLC

Ключевые слова: тяжелая нефть, кавитация, вязкость, трубопроводный транспорт, эмульсия, микрокрекинг.

e-mail: S.T.Aliyev@gmail.com

DOI.10.37474/0365-8554/2020-10-41-46

Бору камарли ила нәqli zamanı kavitasiya texnologiyalarının perspektivliyinin öyrənilməsi

S.T. Əliyev

SOCAR Midstream Operations LLC

Açar sözlər: ağır neft, kavitasiya, özlülük, boru kamari, emulsiya, mikrokreking.

Maqalada ağır neftlerin boru kamərləri ilə nəqli zamanı mənfəi təsir göstərən amillər araşdırılmış və yaranan problemlərin həllində alternativ bir metod olaraq kavitasiya proseslərindən istifadə edilməsi nəzərdən keçirilmişdir.

Azərbaycan yataqlarından hasil edilən yüksək özlüklü neftlərin laboratoriya tədqiqatları əsasında, hidrodinamik kavitasiya sisteminə ağır neftin modernləşdirilməsinin şərtləri, parametrləri və nəticələri öyrənilmişdir. Bundan əlavə, təcrübələr nəticəsində kavitasiya prosesi zamanı ağır neftlərin özlülüyünün dəyişmə mexanizmi izah edilmiş və bu texnologiyanın kommersiya miqyasında istifadəsinin mümkünlüyü təhlil olunmuşdur.

Study employment perspectives of cavitation technologies in pipeline transportation

S.T. Aliyev

SOCAR Midstream Operations LLC

Keywords: heavy oil, cavitation, viscosity, pipeline transportation, emulsion, microcracking.

The paper explores the aspects negatively affecting the pipeline transportation of heavy oil and reviews the implementation possibility of cavitation processes as an alternative method of solving occurring problems.

Based on the laboratory researches of abnormal oil from Azerbaijan fields, the parameters and technical upgrade of heavy oil in the system of hydrodynamic cavitation have been studied. Moreover, as a result of carried out experiments, the operation mechanism of cavitation process during reduction of heavy oil viscosity has been described and the implementation prospect of this technology in commercial cases analyzed as well.

В последние два десятилетия в мировой нефтяной промышленности произошли значительные изменения, создавшие новую производственную и коммерческую ситуацию. Все эти процессы глубоко затрагивают добычу, потребление и торговлю нефтью, которая, вопреки серьезным усилиям по увеличению удельного веса альтернативных источников энергии, остается главным энергетическим ресурсом и продолжает оказывать существенное влияние на развитие глобальной экономики [1].

Нефть, в свою очередь, это в основном смесь углеводородов, которую условно можно разделить на легкую и тяжелую, учитывая её вязкость и плотность. Вязкость обычной легкой нефти колеблется в интервале 0.001–0.01 Па·с, а вязкость тяжелой нефти выше 0.02 Па·с [2]. Для сравнения можно отметить, что вязкость воды составляет 0.001 Па·с.

Сырая нефть с API плотностью 22.3° классифицируется как тяжелая [3], с API 10° или менее относится к группе сверхтяжелых нефтей, которые тяжелее воды. Напротив, плотность обычной легкой нефти (Brent & WTI) колеблется между 38° и 40° API.

Следует отметить, что добыча, транспортировка и переработка тяжелой нефти по сравнению с легкой более трудоемкий процесс, поскольку существующие на сегодняшний день традиционные технологии были рассчитаны в основном на производство легкой нефти. Но, несмотря на это, растущий спрос на нефть и постепенное истощение залежей традиционной легкой нефти, вследствие долгой эксплу-

атации, увеличивает спрос на добычу тяжелой нефти.

Мировые запасы тяжелой нефти в основном приходятся на долю таких стран как Канада, США и Венесуэла. По последним статистическим данным, в Венесуэле больше тяжелой нефти, чем на Ближнем Востоке. В настоящее время Канада является ведущим мировым производителем тяжелой нефти, и, по оценкам, нефтеносных песков в Канаде достаточно для удовлетворения её нынешнего спроса в течение более 200 лет [4].

Состав тяжелой нефти включает малую концентрацию низкомолекулярных соединений и легких фракций на фоне высокого обьема асфальтенов, смол и парафинов [5]. Также существует утверждение, что вязкость тяжелой нефти варьируется в зависимости от объемной доли, химической структуры и физико-химических свойств асфальтенов. В свою очередь известно, что сорта нефти, содержащие значительные объемы асфальтенов и нафтеновых кислот, склонны к образованию устойчивых водонефтяных эмульсий, которые являются сложно разделяемыми (вода и нефть) дисперсными системами [6].

Кроме того, тяжелая нефть также содержит большое количество серы, азота, солей и тяжелых металлов, таких как никель и ванадий [7].

Как было отмечено, операции, связанные с тяжелой нефтью, в том или ином виде сталкиваются с технологическими и финансовыми проблемами. Один из основных корней проблемы заключается в высокой вязкости тяжелой нефти, которая и приводит к осложнениям на всех этапах производства. Например, снижение отдачи нефти пластом из-за его очень низкой подвижности при низкой температуре.

На следующем этапе производства высокая вязкость негативно влияет на поверхностные операции, а именно осложняет процессы обезвоживания и обессоливания нефти.

С другой стороны, транспортировка тяжелой нефти, особенно по трубопроводам, тоже затрудняется, так как высокая вязкость нефти увеличивает затраты на преодоление больших потерь давления на трение.

Учитывая вышеупомянутые трудности, связанные с тяжелой нефтью, все более актуальной становится разработка новых ресурсосберегающих технологий для её добычи, транспортировки и переработки.

Существующие на сегодняшний день реше-

ния основаны на применении различных технологических методов, таких, как термическая обработка, добавление химических присадок, смешивание с легкими углеводородами, электростатические устройства и другие альтернативные технологии. Все эти технологии имеют общую цель: уменьшить вязкость тяжелой сырой нефти и улучшить её качество [8].

Задача данной статьи состоит в том, чтобы показать возможность применения кавитационных процессов как альтернативного метода для решения проблем, связанных с транспортировкой тяжелой нефти. Хотя применение кавитационного явления в различных операциях с нефтью уже давно изучается учеными, тем не менее, о внедрении в промышленных масштабах говорить еще рано из-за нехватки знаний, опыта и доказательств.

Как было отмечено ранее асфальтены, смолы и парафины, содержащиеся в больших концентрациях в составе тяжелой нефти и увеличивающие температуру её замерзания, являются составной частью высоковязкой нефти. Асфальтены представляют собой полициклические ароматические сильно конденсированные тяжелые молекулы, которые рассматриваются как продукты уплотнения смол [9]. Молекулы парафина и смол образуют некоторого рода беспорядочно расположенные длинные решетки в составе нефти, из-за чего вязкость не подчиняется законам Стокса, Ньютона и Пуазейля. Поэтому система оказывает значительное сопротивление силам сдвига.

Кроме того, сочетание асфальтенов, смол и парафинов в составе нефти способствует созданию условий для формирования ленточных агрегатов парафиновых кристаллов и их прилипанию к поверхности, тем самым образуя асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО) в трубах.

Исследования последних лет показывают возможность улучшения вышесказанных реологических и качественных свойств нефти с применением кавитационных технологий.

Кавитация определяется как генерация, последующий рост и разрушение пузырьков/полостей пара или газа в жидкости при местном понижении давления до давления насыщенных паров жидкости в результате увеличения скорости (гидродинамическая) или прохождения акустической волны (акустическая). Это происходит, вследствие того что созданное отрицательное давление выше, чем локальный пре-

дел прочности жидкости, так как образование полостей требует преодоления сил сцепления жидкости. Силы сцепления в свою очередь варьируются от жидкости к жидкости, учитывая тип, состав и чистоту. Чем больше жидкости загрязнено мелкими частицами, тем легче инициировать кавитацию при умеренных отрицательных давлениях.

Схлопывание кавитационных пузырьков сопровождается всплесками давления (до нескольких сотен МПа) и температуры (в несколько тысяч градусов Кельвина) при том аналогичные условия окружающей среды остаются без значительных изменений. Разрушение пузырьков происходит с высокой скоростью, что приводит к возникновению миллионных очагов высокой температуры и давления, иными словами создаются экстремальные физико-химические условия. Таким образом кавитацию можно использовать для проведения различных реакций, требующих жестких условий при минимальных затратах для изменения окружающей среды [10].

Существует несколько методов генерации кавитации, но в основном в нефтяной промышленности применяются гидродинамическая и акустическая.

Гидродинамическая кавитация генерируется при изменении давления за счет областей переменной скорости, созданной при помощи геометрии системы. Примерами такой геометрии могут быть сужения в кранах, дроссельных клапанах, вентилях, диафрагмах, задвижках, насосах, гидротурбинах, трубах Вентури и т.д.

Акустическая кавитация создается изменением давления в жидкости с помощью звуковых волн, обычно ультразвуковых (16 кГц–100 МГц). Химические изменения, связанные с кавитацией, вызванной прохождением звуковых волн, обычно называют сонохимией [11].

Ультразвуковая кавитация можно применить для разрушения водонефтяных эмульсий при трубопроводном транспорте нефти. Водонефтяные эмульсии в основном образуются в результате длительной эксплуатации месторождений и заводнения пластов, а также при искусственном воздействии на призабойную зону скважины для увеличения добычи.

Как известно в состав нефти входят естественные эмульгаторы, такие как коллоидные растворы смолы, асфальтены, парафины, которые способствуют образованию устойчивых

водонефтяных эмульсий. Современные методы обезвоживания нефти включают в себя отстаивание в специальных отстойниках, использование электрических полей, добавление различных химических реагентов, применение коалесцирующих фильтров. В случае тяжелой нефти, которая богата содержанием вышеупомянутых эмульгаторов, отделение воды от нефти традиционными методами затрудняется.

Известно, что для разрушения водонефтяных эмульсий необходимо протекание таких процессов как разделение, коагуляция, коалесценция и последующая седиментация воды. В недавних работах ученых было выявлено, что кавитационное воздействие может усилить демульгирование водонефтяных эмульсий. Демульгирование при кавитации происходит в результате локальных всплесков температуры и давления, вследствие чего разрушаются межфазные стабилизирующие пленки, являющиеся основным барьером при обезвоживании нефти.

Как уже отмечалось ранее, основной проблемой тяжелой нефти при транспортировке является её вязкость, которая делает этот процесс не энергоёмким.

Одним из самых ранних работ по применению кавитации для улучшения реологических свойств нефти является исследование А.В. Соколова, согласно которому вязкость нефти под воздействием ультразвуковой кавитации уменьшается на 20 % [12].

Также применение акустической кавитации в целях уменьшения вязкости можно встретить в недавней работе И.Ци, который сообщает, что ультразвуковая обработка по сравнению с традиционными технологиями висбрекинга требует на 40–45 % меньше энергетических затрат [13].

Несмотря на то что акустическая кавитация по сравнению с гидродинамической имеет ограничения по масштабированию и более низкую энергоэффективность, внимание исследователей в основном было сосредоточено на акустической кавитации. В связи с чем было проведено всего несколько исследований по обогащению тяжелой нефти гидродинамической кавитацией.

Учитывая вышесказанное, были проведены серии экспериментов, по изменению реологических свойств азербайджанской нефти в системе гидродинамической кавитации, на основании которых изучались условия, параме-

Таблица 1

Показатели	Результаты экспериментов					
Вязкость до кавитационной зоны при 20 °С, мм ² /с	15.8	13.9	12.9	13.6	14.9	14.2
Вязкость после кавитационной зоны при 20 °С, мм ² /с	13.6	12.1	11.2	11.8	11.8	12.1
Йодное число до кавитации, г йода на 100 г фракций	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.5
Йодное число после кавитации, г йода на 100 г фракций	1.7	1.19	0.97	1.16	1.4	1.1

ты и результаты модернизации тяжелой нефти.

Эксперименты проводились на устройстве кавитационного воздействия, основой для создания которой была трубка Вентури. За счет геометрии системы была достигнута высокая скорость, при которой давление падало до значения давления насыщенных паров, что приводило к образованию и схлопыванию кавитационных полостей.

В результате воздействия высокоэнергетических импульсов (высокой температуры и давления) кавитационных пузырьков, большие молекулы тяжелой нефти превращаются в легкие углеводородные молекулы, что приводит к уменьшению вязкости после кавитационной зоны.

Снижение кинематической вязкости азербайджанской нефти при прохождении через кавитационную зону показано в табл. 1.

Результаты анализов тяжелой нефти до и после кавитационной зоны дают основание утверждать, что, вследствие разрыва межмолекулярных связей в нефти протекает процесс микрокрекинга, о чем свидетельствует увеличение йодного числа (согласно ГОСТ-2070-82).

Следует отметить, что на интенсивность возникновения кавитации и на её развитие в нефти влияют давление насыщенного пара нефти, крутизна кривой зависимости давления насыщенного пара нефти от температуры, вязкость, поверхностное натяжение, количество растворенного и свободного газа в нефти, время пребывания нефти в зоне с пониженным давлением, характер самого потока до входа в кавитационную зону (ламинарный или турбулентный) и т. д. Вязкость может оказывать двустороннее действие на кавитационный потенциал нефти. С одной стороны, высокая

вязкость нефти в состоянии способствовать увеличению силы сцепления жидкости, тем самым препятствуя образованию кавитационных полостей. С другой стороны, высокая вязкость, создавая сопротивление может увеличить потери давления при сужении у входа в кавитационное устройство до мест возникновения кавитации, где необходимо добиться значения давления насыщенных паров, тем самым ускорить наступление кавитации.

В нефтехимии принято считать, что соотношение парафина к смоле и к асфальтену являются ключевыми параметрами, контролирующими стабильность парафиновых и асфальтовых структур в составе нефти. Когда доля асфальтенов по отношению к парафину уменьшается, то за счет увеличения влияния смол парафиновые кристаллы образуют ленточные агрегаты, повышающие вязкость. А так как в результате кавитации в нефти протекает микрокрекинг, то кавитация может в той или иной мере изменить соотношение парафина к смоле и асфальтену, тем самым привести к вариации вязкости.

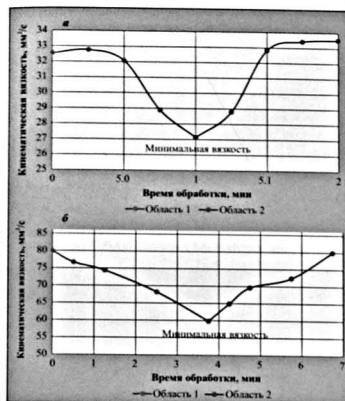
Для изучения данной теории были проведены эксперименты изменения вязкости в зависимости от времени кавитационного воздействия. Опыты проводились с пробами парафинистой и смолистой нефти месторождений Шыхбаги и Ширван, характеристики которых даны в табл. 2.

На основании экспериментов были построены графики зависимости кинематической вязкости нефти от времени кавитационной обработки для нефти месторождений Шыхбаги и Ширван (рисунки).

Как видно из графиков изменение вязкости разделено на две области. В первой области кавитационная обработка ускоряет диффузию

Таблица 2

Месторождения	Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	Массовая доля, %		
		парафин	смола	асфальтен
Шыхбаги	32.53	12.9	15.58	2.69
Ширван	79.86	3.88	13.27	6.24



Изменение кинематической вязкости нефти месторождений Шыхбаги (а) и Ширван (б) в зависимости от времени кавитационной обработки

нефти в полости парафина, интенсифицирует процесс его разрушения, т. е. С-С или С-С связи молекул тяжелой нефти разрываются и образуются свободные радикалы, что и приводит к снижению вязкости. Вторая область начинается с момента роста вязкости, когда уже образовавшиеся свободные радикалы со временем идут на восстановление, образуя более тяжелые молекулы в результате кавитацион-

ных микропотоков и турбулентностей. В этот промежуток времени не только парафин, но и свободные радикалы асфальтена могут выступать зародышами для создания тяжелых молекул. Это значит, что с увеличением времени кавитационной обработки аномальные свойства нефти в числе молекул парафина, смол и асфальтенов могут восстановиться.

Также следует отметить, что эффект кавитационной обработки на уменьшение вязкости получился более ощутимым на смолистой нефти месторождения Ширван (25.1 %), чем на парафинистой нефти месторождения Шыхбаги (16.6 %).

На основании проведенных опытов и изучения влияния кавитации на нефть, можно сделать заключение, что каждая нефть имеет оптимальное время кавитационного воздействия, определяющееся точкой минимальной вязкости, после достижения которой вязкость начинает возрастать. Данный промежуток времени должен быть учтен при применении кавитации для уменьшения вязкости тяжелой нефти. Кроме того, наиболее важным результатом данного исследования с точки зрения технологического процесса применения кавитации является то, что она чувствительна к характеристикам нефти. Это означает, что каждой нефти присущ определенный процесс разработки, и перед тем, как создать крупномасштабную установку нужно в обязательном порядке выполнить лабораторные испытания и экспериментальные исследования.

Список литературы

1. Яковлев П.П. Нефть в глобальной экономике и мировой торговле // Международная торговля и торговая политика, 2018, № 3, с. 100-114.
2. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S., Katti S. Current Knowledge and Potential Applications of Cavitation Technologies for the Petroleum Industry // Ultrasonics Sonochemistry, 2018, v. 42, pp. 493-507.
3. Conaway C. The Petroleum Industry: A Nontechnical Guide. 1999, Tulsa: Pennwell Publishing Co.
4. Chiras D.D. Environmental science, Non-renewable Energy Sources, 9th edition, 2012, Jones & Bartlett publishers.
5. James G. Speight, Marcel Dekker: The chemistry and technology of petroleum, 2nd edition, 1991, CRC Press New York.
6. Исмаилов Г.Г., Сафаров Н.М., Нурмамедова Р.Г., Алиев С.Т. О возможности применения фрактального анализа для исследования структурных изменений и свойств водонефтяных эмульсий // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Yer Elmləri, 2013, № 1, s. 76-83.
7. Martinez R., Mosqueira M., Zapata B., Mar E., Bernal C. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: a review // Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 75(3-4), pp. 274-282.
8. Quintana L., Chávez C., Olaya E. Sonochemistry: The future of the profitable heavy crude oil operations / Heavy Oil Latin America Conference & Exhibition, 2015.

9. *Nurullayev V.X., Aliyev S.T.* O vliyani kavitatsii na obrazovanie asfal'tosmoloparafinovykh otlozheniy v truboprovodakh // Vestnik Azerbaydzhanskoy Inzhenernoy Akademii, 2013, № 4, с. 66-72.
10. *Parag R. Gogate, Rajiv K. Tayal, Aniruddha B. Pandit.* Cavitation: A technology on the horizon // Current science, 2006, v. 91(1), pp. 35-46.
11. *Nurullayev V.X., Əliyev S.T.* Neftin nəqli və emalı zamanı kavitasiya texnologiyalarının tətbiqinin perspektivliyi barədə // Azərbaycan ali texniki məktəblərinin xəbərləri, 2011, № 5, s. 23-28.
12. *Sokolov A.V., Simkin E.M.* Study of influence of acoustic treatment on rheological properties of some oils // Topics in Nonlinear Geophysics, All-Union Research, Institute of Nuclear Geophysics and Geochemistry, Russia, 1981, pp. 137-142.
13. *Shi C., Yang W., Chen J.* Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction // Ultrasonics Sonochemistry, 2017, v. 37, pp. 648-653.

References

1. *Yakovlev P.P.* Neft' v global'noy ekonomike i mirovoy trgovle // Mezhdunarodnaya trgovlya i trgovaya politika, 2018, № 3, s. 100-114.
2. *Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S., Katti S.* Current Knowledge and Potential Applications of Cavitation Technologies for the Petroleum Industry // Ultrasonics Sonochemistry, 2018, v. 42, pp. 493-507.
3. *Conaway C.* The Petroleum Industry: A Nontechnical Guide. 1999, Tulsa: Pennwell Publishing Co.
4. *Chiras D.D.* Environmental science, Non-renewable Energy Sources, 9th edition, 2012, Jones & Bartlett publishers.
5. *James G. Speight, Marcel Dekker.* The chemistry and technology of petroleum, 2nd edition, 1991, CRC Press New York.
6. *Ismayilov G.G., Safarov N.M., Nurmamedova R.G., Aliyev S.T.* O vozmozhnosti primeneniya fraktal'nogo analiza dlya issledovaniya strukturnykh izmeneniy i svoystv vodonefityanykh emulsiy // Azerbaijan Milli Elmler Akademiyasynyn Kheberleri, Yer Elmleri, 2013, No 1, s. 76-83.
7. *Martinez R., Mosqueira M., Zapata B., Mar E., Bernal C.* Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: a review // Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 75(3-4), pp. 274-282.
8. *Quintana L., Chávez C., Olaya E.* Sonochemistry: The future of the profitable heavy crude oil operations / Heavy Oil Latin America Conference & Exhibition, 2015.
9. *Nurullayev V.Kh., Aliyev S.T.* O vliyani kavitatsii na obrazovanie asfal'tosmoloparafinovykh otlozheniy v truboprovodakh // Vestnik Azerbaidzhanskoy Inzhenernoy Akademii, 2013, No 4, s. 66-72.
10. *Parag R. Gogate, Rajiv K. Tayal, Aniruddha B. Pandit.* Cavitation: A technology on the horizon // Current science, 2006, v. 91(1), pp. 35-46.
11. *Nurullayev V.Kh., Aliyev S.T.* Neftin negli ve emaly zamanı kavitasiya texnologiyalarynyn tetbiginin perspektivliyi barede // Azerbaijan ali texniki mekteblərinin kheberleri, 2011, No 5, s. 23-28.
12. *Sokolov A.V., Simkin E.M.* Study of influence of acoustic treatment on rheological properties of some oils // Topics in Nonlinear Geophysics, All-Union Research, Institute of Nuclear Geophysics and Geochemistry, Russia, 1981, pp. 137-142.
13. *Shi C., Yang W., Chen J.* Application and mechanism of ultrasonic static mixer in heavy oil viscosity reduction // Ultrasonics Sonochemistry, 2017, v. 37, pp. 648-653.