

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.160-169>

УДК 628.16.067.1

Подготовка попутно добываемой воды с целью выработки пара на месторождениях СВН ПАО «Татнефть»

Антонов О.Ю., Кудряшова Л.В., Гафаров Н.Н., Магсумова Р.С.

Институт «ТатНИПИнефть», Бугульма, Россия

Treatment of produced water to be used for steam generation in PJSC TATNEFT's heavy oil fields

O.Yu. Antonov, L.V. Kudryashova, N.N. Gafarov, R.S. Magsumova

TatNIPIneft Institute, Bugulma, Russia

E-mail: GafarovNilN@tatnipi.ru

Аннотация. При разработке месторождений сверхвязких нефтей (СВН) применяют технологии паротеплового воздействия на нефтеносный пласт. В пласт нагнетается пар, а для его выработки используют попутно добываемую воду (ПДВ). Это позволяет существенно снизить воздействие на окружающую среду, т.к. в этом случае сокращаются объем потребления пресной воды для выработки пара и объем ПДВ, подлежащей утилизации.

В ПАО «Татнефть» к настоящему времени запущены и находятся в эксплуатации две установки подготовки ПДВ (УППДВ) «Каменка» и «Кармалка» с производительностью 350 и 700 м³/ч соответственно на которых производится деминерализованная вода для обеспечения питательной водой котельных с целью выработки пара.

В основу технологического процесса на УППДВ положены мембранные методы очистки и обессоливания воды. Технологическая схема УППДВ включает: предварительную очистку ПДВ от остаточной нефти с применением сорбционно-фильтровальной установки (СФУ); блок ультрафильтрации с мембранными элементами для очистки воды от нефти; сорбционные фильтры с активированным углем для доочистки от растворенных органических веществ и растворенных нефтепродуктов; блок обратного осмоса (две ступени) с мембранами для обессоливания воды; анионные фильтры для удаления гидросульфидов; блок дозирования перекиси водорода для полного удаления остаточного содержания сульфид-ионов.

Институтом «ТатНИПИнефть» выполнены исследования по разработке эффективной технологии предварительной очистки ПДВ с применением СФУ перед УППДВ, проведены исследования по дозированию перекиси водорода в деминерализованную воду для нейтрализации остаточного содержания сульфид-ионов, разработана технология и спроектирована установка автоматического дозирования перекиси водорода.

Проведение опытно промышленных работ выявило более эффективные реагенты для химической мойки мембран обратного осмоса.

Эксплуатация первых в России установок подготовки ПДВ для выработки пара, основанных на мембранных методах, показала возможность достижения нормативных требований, предъявляемых к питательной воде для водотрубных котлов.

Ключевые слова: *сверхвязкая нефть, ультрафильтрация, обратный осмос, попутно добываемая вода, концентрация нефти, очистка сточных вод, питательная вода для выработки пара*

Для цитирования: Антонов О.Ю., Кудряшова Л.В., Гафаров Н.Н., Магсумова Р.С. Подготовка попутно добываемой воды с целью выработки пара на месторождениях СВН ПАО «Татнефть»//Нефтяная провинция.-2021.-№1(25).-С.160-169. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.160-169>

Abstract. Steam injection has become a common method of extracting heavy crude oil. To mitigate environmental impact associated with disposal of large volumes of produced water in the heavy oil fields and to decrease the need in fresh water from surface sources, the Company uses the produced water for steam generation.

Currently, PJSC TATNEFT operates two water treatment units, the “Kamenka” unit with the capacity 350 m³/hour and the “Karmalka” unit with the capacity 700 m³/hour to produce demineralized water to be used as feed water for steam generation.

After extensive analysis of the available technologies, the decision was made in favor of membrane methods of water treatment and demineralization that have been realized in the above-mentioned water treatment units. The process includes the following process units and operations: sorption-filtration unit (preliminary cleaning to remove residual oil); ultrafiltration membrane unit (removal of oil); activated carbon sorption filters (further removal of dissolved oil and organic matter); reverse osmosis membranes – two stages (demineralization of water); anionic filters (removal of hydrosulfides); hydrogen peroxide dosing unit (complete removal of sulfide ions).

TatNIPIneft R&D Institute has performed extensive studies to develop an efficient technology of preliminary cleaning of produced water in the sorption-filtration unit; also, TatNIPIneft research engineers have carried out studies on hydrogen peroxide dosing into demineralized water to neutralize residual sulfide ions, and have designed an automatic hydrogen peroxide dosing unit. The performed pilot tests allowed to select the most efficient agents for chemical washing of the reverse osmosis membranes.

Successful operation of the first-in-Russia water treatment units based on the membrane methods has demonstrated that water meets the requirement to feed water for water-tube units for steam generation.

Key words: *heavy oil, ultrafiltration, reverse osmosis, produced water, oil concentration, treatment of effluents, feed water for steam generation*

For citation: O.Yu. Antonov, L.V. Kudryashova, N.N. Gafarov, R.S. Magsumova Podgotovka poputno dobyvaemoj vody s cel'ju vyrabotki para na mestorozhdenijah SVN PAO «Tatneft'» [Treatment of produced water to be used for steam generation in PJSC TATNEFT's heavy oil fields]. Neftyanaya Provintsiya, No. 1(25), 2021. pp. 160-169. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2021.1.160-169> (in Russian)

Многие из зарубежных нефтедобывающих компаний (Worley Parsons Canada, Devon Canada Corporation, Wintershall AG и др.) при разработке месторождения высоковязких нефтей и природных битумов в Канаде и Германии применяют технологии паротеплового воздействия на нефтеносный пласт. В пласт нагнетается пар, а для его выработки используют попутно добываемую воду (ПДВ), что существенно снижает воздействие на окружающую среду, т.к. в этом случае сокращаются объем потребления пресной воды для выработки пара и объем ПДВ, подлежащих утилизации [1].

Для обеспечения питательной водой из ПДВ котлов широкое распространение получила термодистилляционная технология в которой применяется испарительное и компрессионное оборудование [2-4].

Начиная с 2016 года, компания «Татнефть» одной из первых Российских нефтедобывающих компаний приступила к реализации схемы повторного использования ПДВ. К настоящему времени запущены и находятся в эксплуатации две установки подготовки ПДВ (УППДВ) «Каменка» и «Кармалка» с производительностью 350 и 700 м³/ч соответственно на которых производится деминерализованная вода, отвечающая нормативным требованиям, предъявляемым к питательной воде для водотрубных котлов среднего рабочего давления (до 4,0 МПа).

В основу технологического процесса на УППДВ «Каменка» и «Кармалка» положены мембранные методы очистки и обессоливания воды, поскольку при минерализации исходной воды менее 20 г/дм³ экономически целесообразнее использовать обратный осмос, нежели пароконпрессионный метод во всём диапазоне производительности.

Учитывая физико-химические свойства ПДВ и нормативы по питательной воде для паровых котлов (Табл. 1), в технологической схеме применяются следующие основные стадии: очистка от нефти и взвешенных частиц, удаление сероводорода (сульфид-ионов), обессоливание и глубокое умягчение [5-7].

Таблица 1

Физико-химические свойства ПДВ

Показатель	Значение показателя		
	ПДВ УППДВ «Каменка»	ПДВ УППДВ «Кармалка»	Требования к питательной воде для водотрубных котлов с естественной циркуляцией и рабочим давлением пара до 4 МПа [8]
рН	7,2	7,1	8,5-10,5
Плотность, кг/м ³	1000,9	1001,6	не нормируется
Концентрация ионов, мг/дм ³			
HCO ₃ ⁻	2135,4	2127,0	не нормируется
Cl ⁻	300,7	228,8	не нормируется
SO ₄ ²⁻	153,6	124,8	не нормируется
Ca ²⁺	29,6	40,7	не нормируется
Mg ²⁺	22,6	35,3	не нормируется
K ⁺ + Na ⁺	996,7	896,1	не нормируется
Минерализация, мг/дм ³	3638,5	3452,8	не нормируется
Жесткость, мг-экв/дм ³	3,3	4,9	0,01
Щелочность, мг-экв/дм ³	35,1	34,9	0,0
Концентрация SiO ₂ , мг/дм ³	80,6	121,1	не нормируется
Концентрация H ₂ S (сульфидов), мг/дм ³	276,4	53,7	отсутствие
Концентрация нефти / нефтепродуктов, мг/дм ³	55,3	43,3	0,5
Концентрация ТВЧ, мг/дм ³	2,4	0,6	не нормируется

Поскольку обратноосмотические мембраны крайне чувствительны к составу обрабатываемой воды и наличию в ней примесей органической и неорганической природы, нефтепродуктам и ПАВ, то к стадиям предварительной очистки ПДВ перед обратным осмосом предъявляются повышенные требования по надежности и эффективности.

Так первичной и одной из самых основных стадий подготовки ПДВ является предварительная очистка от остаточной нефти, которая осуществляется последовательно в три этапа:

- фильтрованием через жидкостной гидрофобный слой нефти, созданный в верхней части горизонтальных буллитов объемом 200 м³, благодаря которым концентрация нефти в ПДВ снижается от нескольких

граммов на 1 дм³ до 200 мг/дм³;

- отстаиванием в течение 20 часов в вертикальных резервуарах, в которых концентрация нефти снижается до 30-50 мг/дм³ (не более 60 мг/дм³);
- фильтрованием ПДВ через гранулированный материал на основе алюмосиликатных пород с применением сорбционно-фильтровальной установки (СФУ), обеспечивающей на выходе концентрацию нефти не более 10 мг/дм³. Регенерация фильтровального материала обеспечивается обратной промывкой, позволяющей полностью очистить слой от задержанных загрязнений.

Далее предварительно очищенная ПДВ поступает на установку подготовки попутно добываемой воды (УППДВ).

Технологическая схема УППДВ (Рис. 1) включает:

- предварительное охлаждение ПДВ на блоке рекуперационных теплообменниках, в которых деминерализованная вода охлаждает поступающую ПДВ, а затем охлаждение на первичном блоке охлаждения до 50-55⁰С перед блоком ультрафильтрации для более глубокой очистки от эмульгированной нефти;
- блок ультрафильтрации (УФ), включающие мембранные элементы, которые обеспечивают концентрацию нефти в воде не более 0,1 мг/дм³.
- сорбционные фильтры (СФ), загруженные активированным углем, для доочистки от растворенных органических веществ и растворенных нефтепродуктов, чтобы обеспечить требования производителей мембран по концентрации растворенных нефтепродуктов на уровне 0,05-0,1 мг/дм³;
- блок обратного осмоса (ОО, две ступени) с обратноосмотическими мембранами для обессоливания воды до уровня минерализации 300 мг/дм³;
- анионные фильтры (АФ) для удаления гидросульфидов, которые

должны отсутствовать в деминерализованной воде для выработки пара.



Рис. 1. Установка подготовки ПДВ для производства пара.

Эксплуатация УППДВ выявила ряд проблем, которые требуют решения и в настоящее время.

Первичный опыт эксплуатации блоков ультрафильтрации на воде с исходной концентрацией нефти от 30 до 60 мг/дм³ показал, что регламентированная химическая мойка мембран щелочным раствором гипохлорита натрия оказалась малоэффективной против органических отложений, накопленных на поверхности мембраны, что приводило к их неполной отмывке, и при последующей работе к сокращению межмоющего периода до 70-80 % от регламентированного значения. Для повышения межмоющего периода была подобрана более эффективная моющая композиция на основе органических растворителей, ПАВ, щелочи и т.д.

Институтом «ТатНИПИнефть» были проведены исследования по разработке эффективной технологии предварительной очистки ПДВ с применением сорбционно-фильтровальной установки (СФУ) перед УППДВ.

С вводом в эксплуатацию СФУ для предварительной очистки ПДВ концентрация нефти в воде на входе в блоки ультрафильтрации сократилась с 30-60 до менее 10 мг/дм³ (в среднем до 5,0-7,0 мг/дм³), при этом продолжительность периода между мойками мембран УФкратно увеличилась с 100 до 300 фильтроциклов.

В результате эксплуатации обратноосмотических мембран на протя-

жении 1-2 лет выявлены некоторые их особенности:

- период между мойками мембран первой ступени обратного осмоса сократился примерно в 2,0-2,5 раза, что связано с применением ингибитора-антискаланта, не эффективного от отложений, содержащих соединения кремния;
- при исследовании поверхности мембранного полотна, установлено, что силикатные отложения (в пересчете на SiO_2) присутствуют в количестве 3,3-4,5 г/м² поверхности мембранного элемента, а после химической мойки щелочным раствором Трилона Б удаляются не полностью - лишь до 0,27 г/м²;
- за данный период не выявлен рост солесодержания и электропроводности в пермеате обратного осмоса, который может быть вызван нарушением механической прочности полисульфонового слоя композитных мембран вследствие постепенного разрушительного действия на него органических веществ (кетонов, альдегидов, ароматических углеводородов, сложных эфиров и др.), присутствие которых в обрабатываемой воде и применяемых реагентах не исключено;
- за данный период не выявлено негативного влияния высокого значения рН до 10,5 (периодически до 10,8) в сочетании с повышенной температурой (до 35 °С) на целостность полиамидного слоя композитных мембран и соответственно стабильную работу второй ступени обратного осмоса.

Проведение опытно промышленных работ выявило более эффективные реагенты для химических мойки мембран ОО, такие как Гидрохим, Ригро Тесч, а также подобран ингибитор солеотложений, что позволило увеличить межмоечный период работы в 6-10 раз (до 200 -250 часов).

Удаление сероводорода, переведенного в сульфид-ионы в воде после двух ступеней обратного осмоса как на УППДВ Каменка», так и на УППДВ «Кармалка» осуществляется до 10-25 мг/дм³. В дальнейшем удаление сульфид-ионов должно происходить на анионных фильтрах. В

результате эксплуатации установлено, что анионный фильтр не позволяет полностью удалить гидросульфиды, которые должны отсутствовать в деминерализованной воде для выработки пара.

Для полного удаления остаточного содержания сульфид-ионов институтом «ТатНИПИнефть» проведены исследования по дозированию перекиси водорода в деминерализованную воду для их нейтрализации, разработана технология и спроектирована установка автоматического дозирования перекиси водорода в зависимости от концентрации гидросульфидов и объема деминерализованной воды для его нейтрализации химическим способом. На технологию получен патент РФ на изобретение №2720719 «Система обустройства месторождения тяжелой нефти и природного битума».

Таким образом, эксплуатация первых в России установок подготовки ПДВ для выработки пара, основанных на мембранных методах, показала возможность достижения нормативных требований, предъявляемых к питательной воде для водотрубных котлов. В настоящее время продолжаются исследовательские работы, связанные с оптимизацией, повышением стабильности работы блоков УППДВ, технологических параметров работы УФ, СФ, ОО, АФ, теплообменников первичной и вторичной системы охлаждения, и снижением эксплуатационных затрат на подготовку деминерализованной воды.

Список литературы

1. Рациональное использование водных ресурсов при разработке месторождений СВН / Буслаев Е.С., Кудряшова Л.В., Магсумова Р.С. // Сборник докладов научно-технической конференции, посвященной 60-летию ТатНИПИнефть ПАО «Татнефть». – Наб.Челны: «Экспозиция Нефть Газ», 2016. – 438-439 с.
2. Эксплуатационные данные по первой в мировой практике установке SAGD, использующей испарителя для подготовки подпиточной воды для котлов. Уильям.Ф. Хайнс, Роб МакНейлл // World Oil. – 2007'10.
3. Technical Advancements in SAGD Evaporative Produced Water Treatment // JCPT, 2009, т.48 №11.
4. Evaporator choice critical for effective steam production in SAGD operations / Keith Minnich and Dorothy Neu // Oil & Gas Product News. – 05-06.2008. - Volume 12. Number 3. – p.22-23.
5. Исследование свойств попутно добываемой воды на месторождениях сверхвязкой нефти и разработка технологии ее подготовки для повторного использования /

- Е.С. Буслаев, А.В. Лойко, С.В. Ицков, Р.З. Сахабутдинов, М.А. Абрамов // Сборник научных трудов «ТатНИПИнефть». Выпуск № LXXXIV. – М.: ЗАО «Издательство «Нефтяное хозяйство», 2016. – С.247–254.
6. Особенности физико-химических свойств попутно добываемых вод месторождений сверхвязкой нефти ПАО «Татнефть» / Г.Р. Войкина, И.В. Стратилатова, Р.С. Магсумова, А.С. Нурутдинов, И.Я. Хабибуллин // Сборник научных трудов «ТатНИПИнефть». Выпуск № LXXXV – Набережные Челны: ООО «Экспозиция Нефть Газ», 2017. – 392-395 с.
 7. Исследования методов очистки попутно добываемой воды Ашаль-чинского месторождения от сероводорода / Р.М. Гарифуллин, А.А. Ануфриев, Р.З. Сахабутдинов, А.Н. Шаталов, Н.В. Антонова, Р.Р. Ахмадуллин // Сб. науч. тр. / ТатНИПИнефть. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2010. – С.254–260.
 8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением», утвержденные Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору приказом № 116 от 25 марта 2014 г.

References

1. Buslaev E.S., Kudryashova L.V., Magsumova R.S. *Ratsionalnoe ispolzovanie vodnykh resursov pri razrabotke mestorozhdeniy SVN* [Efficient use of water resources in the process of development of heavy oil reserves]. Proc. of Science and Technology Conference dedicated to the 60th anniversary of TatNIPIneft – PJCS TATNEFT. Naberezhnye Chelny: ООО Ekpozitsiya Neft Gas Publ., 2016. pp. 438-439 (in Russian)
2. Heins, William, McNeill, Rob: Vertical-Tube Evaporator System Provides SAGD-Quality Feed Water. *World Oil Magazine*, 2007, October (in English)
3. Technical Advancements in SAGD Evaporative Produced Water Treatment // JCPT, 2009, т.48 №11. (in English)
4. Evaporator choice critical for effective steam production in SAGD operations / Keith Minnich and Dorothy Neu // *Oil & Gas Product News*. – 05-06.2008. – Volume 12.Number 3. – p.22-23. (in English)
5. Buslaev E.S., Loiko A.V., Itskov S.V., Sakhabutdinov R.Z., Abramov M.A. *Issledovanie svoystv poputno dobyvaemoy vody na mestorozhdeniyakh sverkhvyazkoi nefti i razrabotka tekhnologii ee podgotovki dlya povtornogo ispolizovaniya* [Study of characteristics of associated water produced with heavy oil and development of water treatment technology for water recycling]. Collection of scientific papers of TatNIPIneft, Iss. LXXXIV. Moscow: ЗАО Neftyanoe Khozyaistvo Publ., 2016. pp. 247–254 (in Russian)
6. Voikina G.R., Stratilatova I.V., Magsumova R.S., Nurutdinov A.S., I.Ya. Khabibullin *Osobennosti fiziko-khimicheskikh svoystv poputno dobyvaemykh vod mestorozhdeniy sverkhvyazkoi nefti PAO Tatneft* [Characteristics of physicochemical properties of associated water in heavy oil fields of PJSC TATNEFT]. Collection of scientific papers of TatNIPIneft, Iss. LXXXV. Naberezhnye Chelny: ООО Ekpozitsiya Neft Gas Publ., 2017. pp. 392-395 (in Russian)
7. Garifullin R.M., Anufriev A.A., Sakhabutdinov R.Z., Shatalov A.N., Antonova N.V., Akhmadullin R.R. *Issledovaniya metodov ochistki poputno dobyvaemoy vody Ashalchinskogo mestorozhdeniya ot serovodoroda* [Research into Methods for Hydrogen Sulfide Removal from Produced Water in the Ashalchinskoye Field]. Collection of scientific papers of TatNIPIneft. Moscow: ОАО VNIIOENG Publ., 2010. pp. 254–260 (in Russian)
8. Federal Rules and Regulations for Industrial Safety “Regulations of industrial safety for hazardous facilities using equipment working under excess pressure”, approved by Federal Service for Ecological, Technological and Atomic Inspection by Order No. 116 as of 25 March 2014. (in Russian)

Сведения об авторах

Антонов Олег Юрьевич, отдел ИППНГВ, институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина
Россия, 423236, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, 32
E-mail: antonovoy@tatnipi.ru

Кудряшова Любовь Викторовна, отдел ИППНГВ, институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина
Россия, 423236, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, 32
E-mail: kudryashova@tatnipi.ru

Гафаров Нил Назипович, отдел ИППНГВ, институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина
Россия, 423236, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, 32
E-mail: GafarovNilN@tatnipi.ru

Магсумова Резеда Салаватовна, отдел ИППНГВ, институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина
Россия, 423236, Бугульма, ул. Мусы Джалиля, 32
E-mail: magsumova@tatnipi.ru

Authors

O.Yu. Antonov, Wellstream Treatment Dpt., TatNIPIneft Institute–PJSC TATNEFT
32, Musa Jalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation
E-mail: antonovoy@tatnipi.ru

L.V. Kudryashova, Wellstream Treatment Dpt., TatNIPIneft Institute–PJSC TATNEFT
32, Musa Jalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation
E-mail: kudryashova@tatnipi.ru

N.N. Gafarov, Wellstream Treatment Dpt., TatNIPIneft Institute–PJSC TATNEFT
32, Musa Jalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation
E-mail: GafarovNilN@tatnipi.ru

R.S. Magsumova, Wellstream Treatment Dpt., TatNIPIneft Institute–PJSC TATNEFT
32, Musa Jalil st., Bugulma, 423236, Russian Federation
E-mail: magsumova@tatnipi.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.2020

Принята к публикации 13.03.2021

Опубликована 30.03.2021