



К. В. Рыбаренко
руководитель научно-исследовательского центра
компании «Шлюмберже»

Многофазная расходомерия: принципы работы и опыт применения на примере технологии Vx

В данной статье приведены реальные результаты применения технологии Vx в полевых условиях для решения различных задач, для различных типов флюида и характеров потока. Приведены сопоставления с традиционными сепарационными методами замеров дебитов. In this article the real results of technology Vx application in the field terms for decision of different tasks, different fluids' and streams' types are produced. Comparisons with traditional methods of separation's samples of flow rates are produced.

Ключевые слова: трубка Вентури Vx, флюид, дебит, пульсация, газоконденсатные исследования.
Keywords: Venturi tube Vx, fluid, flow rate, pulsation, gas-condensate investigations.

Основными задачами многофазной расходомерии добывающих скважин является оценка дебитов работы скважины без разделения фаз с высокой точностью и высоким разрешением по времени. Основными принципами замера расхода смеси являются: замеры дифференциального давления на сужающем устройстве, механические замеры расхода и кросс-корреляционные методы. Фракции в потоке определяются с применением замеров поглощения гамма-излучения, оценки общих электрических свойств и применением микроволновой технологии. Каждая из технологий обладает рядом недостатков и преимуществ и может применяться в зависимости от специфики поставленных задач. Наиболее точными, универсальными и надежными устройствами на сегодняшний день считаются расходомеры, построенные на принципе замеров дифференциального давления и гамма-поглощения. Примером такого устройства является многофазный расходомер, построенный по технологии Vx.

На сегодняшний день существует две модификации многофазных расходомеров: стационарная и мобильная. Модификации используют принципы многофазной расходомерии,

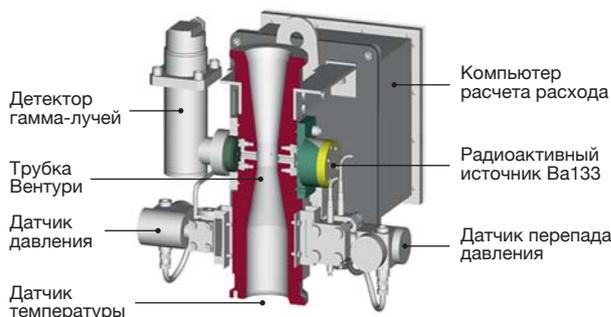


Рис. 1
Устройство многофазного расходомера Vx

изложенные в предыдущей статье. На **рис. 1** представлена последняя реализация многофазного расходомера. Данная схема применяется на всех типах установок на сегодняшний день. Основным фактором, определяющим область применимости многофазных расходомеров является, соотношение дебитов газа и жидкости. Линейка стандартных типоразмеров трубки Вентури Vx представлена следующими диаметрами: 88, 52 и 29 мм. В зависимости от предполагаемых дебитов работы скважины и газовых факторов на этапе планирования замеров подбирается та или иная конфигурация трубки.

Области применения различных трубок достаточно сильно пересекаются, что

предоставляет богатые возможности подбора оптимальной трубки для каждого конкретного условия, как для стационарных измерений, так и для динамических испытаний скважин на различных режимах. На этапе внедрения и испытания технологии многофазной расходомерии была проделана очень серьезная метрологическая работа - было проведено более 8000 испытаний на более чем 15 различных проливных стендах по всему миру. Испытания проводились самыми авторитетными независимыми исследовательскими и метрологическими структурами в Северной и Южной Америке, Азии и Европе. Производились испытания для 2 и 3 фаз, для жидких и газообразных углеводородов, с использованием сырой и тяжелой нефти, в условиях повышенного содержания сероводорода в трехфазном потоке и др. По результатам таких испытаний получены подтверждения точности измерений дебитов в широком диапазоне параметров: обводненность: 0 – 100%, давление: 5 – 100 атм., объемная доля газа: 0 – 100%, вязкость: 1 – 3000 сП.

На сегодняшний день ведутся испытания по расширению данных границ применимости, в первую очередь, за счет высоковязкой нефти. В России также проделана серьезная

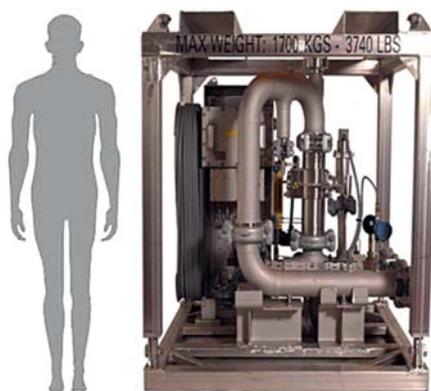


Рис. 2.
Мобильная установка Phase Tester

работа и получен полный пакет разрешений, лицензий и метрологических сертификатов на применение данной технологии: сертификаты ГОСТ Р (РОСС NO.АИ30.В10376, РОСС NO.ГБ04.В01334 согласно ГОСТ 51330.0, ГОСТ 51330.1 и ГОСТ 51330.8); разрешение на применение расходомеров Vx (РРС 00-37974), метрологический сертификат (NO.С.29.006.А 37940 согласно ГОСТ Р 8.615) и др. Это значительно упрощает возможности непосредственного применения многофазных расходомеров данной системы как для сервисных компаний, так и для недропользователей.

Помимо стационарных устройств также существует мобильная модификация,

реализующая технологию Vx. На **Рис. 2** представлена установка PhaseTester, представляющая собой расходомер Vx, укомплектованный трубной обвязкой, устройством, гомогенизирующим приток, портом установки пробоотборного модуля PhaseSampler, портами доступа и портами отбора проб из линии в различных точках, здесь же установлен компьютер расчета потока и кабеля связи. Все это смонтировано в достаточно легком и компактном контейнере. Также существует арктическое исполнение данного прибора, которое применяется в России. Данная установка применяется повсеместно в мире (включая Россию) для гидродинамических и газоконденсатных исследований. На сегодняшний день в России и в мире производится более 5000 работ в год с применением данной установки. Можно с уверенностью считать, что технология прошла достаточную апробацию в стендовых и полевых условиях. К преимуществам применения данных многофазных устройств можно отнести: надежную технологию расходомерии, основанную на самых точных физических принципах замеров дебитов; мгновенные замеры состава притока на различных режимах; возможности продолжительного мониторинга; измерение дебитов с высоким разрешением, что дает возможность максимально оптимизировать режимы работы скважины; оперативный учет конденсатной и водной фазы; снижение влияния «ошибки оператора» на качество замеров; исследования без потери газа (отжига) и без потери энергии скважины, необходимой для дальнейшей транспортировки флюида; мобильность и простоту монтажа. Все это дает хорошие предпосылки к дальнейшему росту применения данной технологии при испытаниях скважин.

Далее приведены некоторые примеры применения технологии многофазной расходомерии и ее сопоставление с традиционными методами.

С момента появления многофазных расходомеров в России на нефтяных месторождениях было сделано более 1000 различных полевых исследований с применением технологии Vx. В ряде случаев многофазные расходомеры являются единственным надежным средством замера дебитов. Так, в условиях значительных вариаций газовых факторов от скважины к скважине, где сепарационные методы требуют тщательной настройки на все изменения динамики скважин, зачастую невозможно получить удовлетворительные результаты. Многофазные расходомеры позволяют определить дебиты по всем трем фазам флюида, проходящего через трубку Вентури. Основными параметрами на

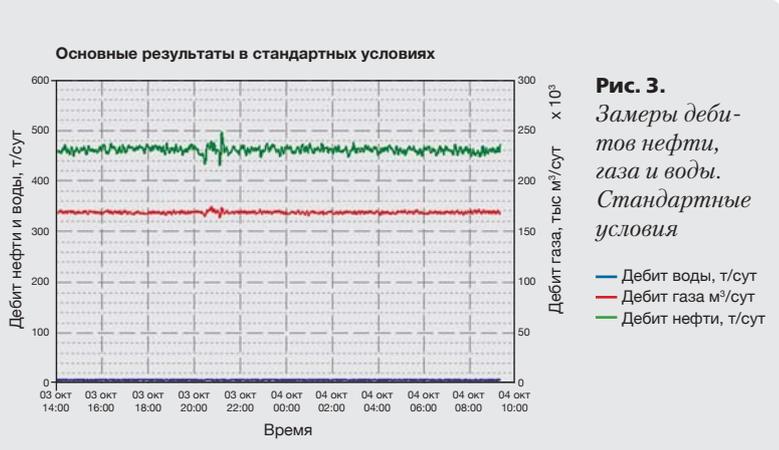


Рис. 3. Замеры дебитов нефти, газа и воды. Стандартные условия



Рис. 4. Замеры давления и температуры в линии

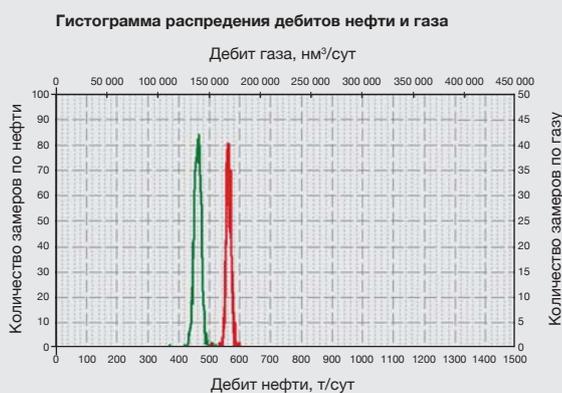


Рис. 5. Гистограмма распределения дебитов нефти и газа

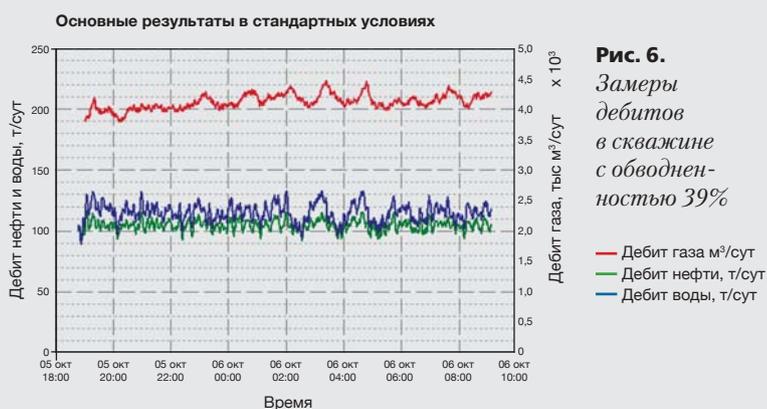


Рис. 6. Замеры дебитов в скважине с обводненностью 39%

выходе являются дебиты нефти, газа и воды с высоким разрешением по времени. **Рис. 3** является примером стабильной работы нефтяной скважины на протяжении 19 часов: обводненность близка к нулевой, дебиты газа и нефти постоянны и стабильны. В процессе проведения работ постоянно производится мониторинг линейных давлений и температур (**рис. 4**). При сопоставлении графиков замеров дебитов видно, что единственное колебание, отмечаемое в процессе замеров, соответствует колебаниям давления и температуры в линии.

Высокое разрешение замеров по времени позволяет применять различные методы статистического анализа для более точной характеристики потока флюидов. Например, на **рис. 5** представлена гистограмма дебитов газа и нефти, построенная по результатам замеров. Даже этот простейший анализ позволяет оценить характер и стабильность притока, выделить характерные значения дебитов и получить их распределения. В данном случае скважина работает стабильно и гистограммы распределения имеют очень простую форму, позволяя легко определить доминирующий дебит за весь промежуток исследования. Помимо этого может представлять интерес результат замеров вязкости и плотности отбираемой на устье жидкости для определения входных параметров работы многофазного расходомера. При применении пробоотборных устройств PhaseSampler можно получать представительные устьевые пробы флюидов, а с использованием информации по дебитам работы скважины – получить возможность корректно рекомбинировать их для оценки композиционного состава и PVT свойств.

На **рис. 6** приведен является 14 часовая замер на скважине с обводненностью порядка 39%. Очевидно, что работа скважины является значительно менее стабильной по сравнению с предыдущим примером (**рис. 3**). Можно отметить флуктуации дебитов газа и жидкости, особенно в начале второй половины интервала исследования, которые позволяют охарактеризовать режим притока в данной скважине как пульсирующий.

На **рис. 7** приведена другая скважина, работающая с применением ЭЦН. Замеры проводились на протяжении 19 часов. В процессе замеров была отмечена явная пульсация дебитов по нефти и газу.

При увеличении участка по времени участка такого режима пульсации, видно, что процесс достаточно устойчивый и пульсация повторяется с постоянной периодичностью. Построенная гистограмма распределения

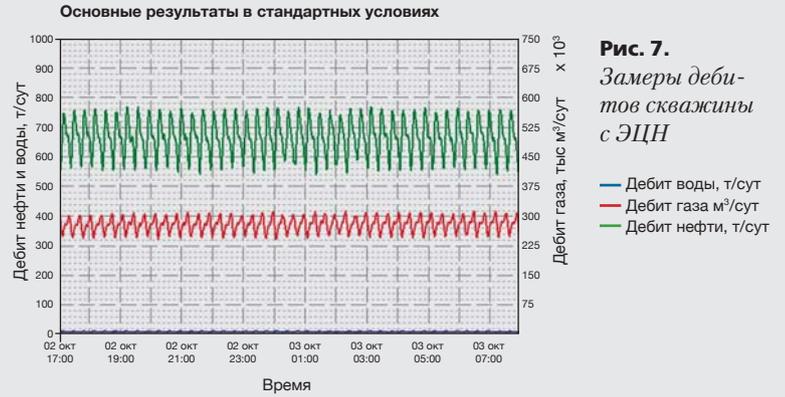


Рис. 7. Замеры дебитов скважины с ЭЦН



Рис. 8. Гистограмма распределения дебитов скважины с ЭЦН

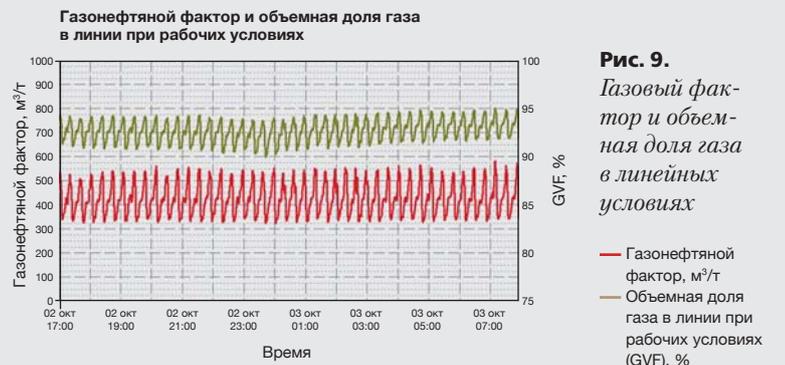


Рис. 9. Газовый фактор и объемная доля газа в линейных условиях

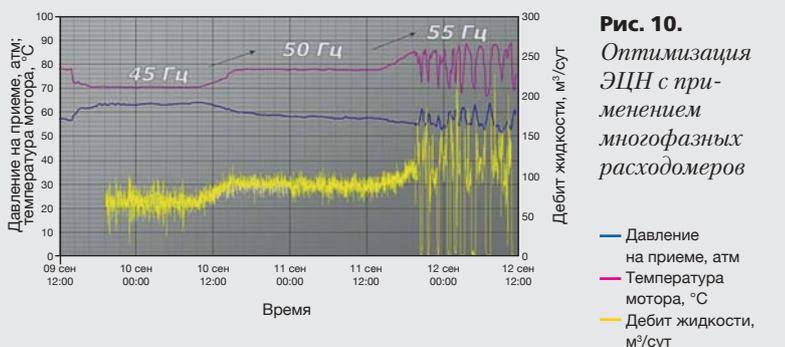


Рис. 10. Оптимизация ЭЦН с применением многофазных расходомеров

дебитов (рис. 8) также достаточно сильно отличается от гистограммы стабильно работающей скважины (рис. 5). Во время замеров было сделано предположение, что насос работает не в оптимальном режиме, под насосом накапливается газ, который потом прорывается через ЭЦН. Для более детального анализа были построены графики дополнительных параметров работы скважины: замеры газонефтяного фактора и объемной доли газа в линейных условиях (рис. 9).

Важно, что мы можем получить ряд достаточно интересных характеристик работы скважины и притока флюидов помимо базовых – давления, температуры и дебитов каждой отдельной фазы. Последующая эксплуатация насоса в таком режиме привела к его износу и остановке. Таким образом, на раннем этапе, до полного износа мотора, появляется возможность диагностировать некорректные режимы работы и предупредить износ оборудования.

Данные возможности многофазных расходомеров были использованы для оптимизации методов механизированной добычи. Следующий пример демонстрирует, как задача оптимизации ЭЦН с применением многофазных расходомеров решалась на практике. На рис. 10 представлены режимы работы ЭЦН – давления на приеме и дебиты жидкости. Видно, что при переходе от режима 45 Гц к режиму 50 Гц, как и следовало ожидать, дебиты жидкости увеличиваются. При последующем переходе на 55 Гц вместо увеличения дебитов наблюдается изменение режима потока, следовательно, происходит разгазирование нефти и накопление газа с последующим прорывом через насос, что явно не соответствует оптимальному режиму работы. Таким образом, данный подход позволяет в режиме реального времени непосредственно на скважине подобрать оптимальную подачу насоса для каждой скважины индивидуально на основе реальных, а не расчетных данных.

Газоконденсатные исследования являются одной из наиболее сложных задач для многофазных расходомеров, равно как и для традиционных методов.

Если для традиционного сепаратора необходимо качественное разделение фаз и отсутствие уноса конденсата, то многофазные расходомеры вынуждены работать в области очень высокого газового фактора. Минимальная ошибка в дебитах газа приводит к огромной (в процентном отношении) ошибке в дебите конденсата. При этом, для того чтобы добиться заявленной точности замеров по жидкости, требуется целый ряд мер, включающий

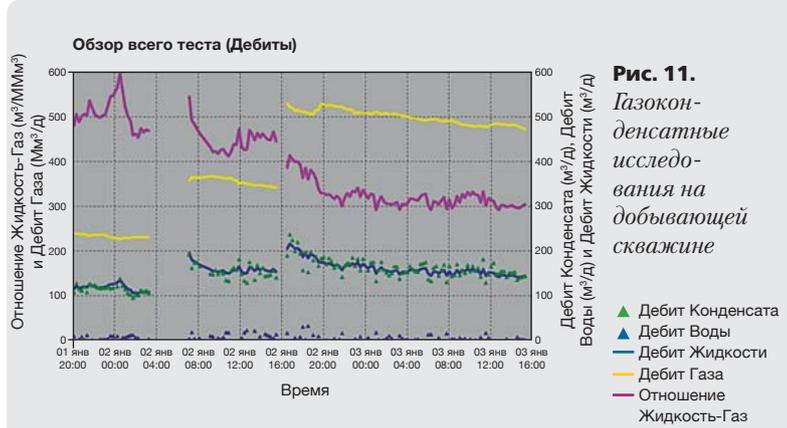


Рис. 11. Газоконденсатные исследования на добывающей скважине

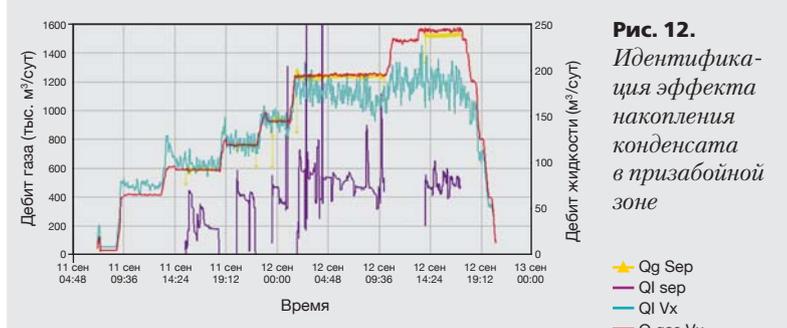


Рис. 12. Идентификация эффекта накопления конденсата в призабойной зоне



Рис. 13. Замеры дебитов в процессе очистки призабойной скважины от фильтрата бурового раствора

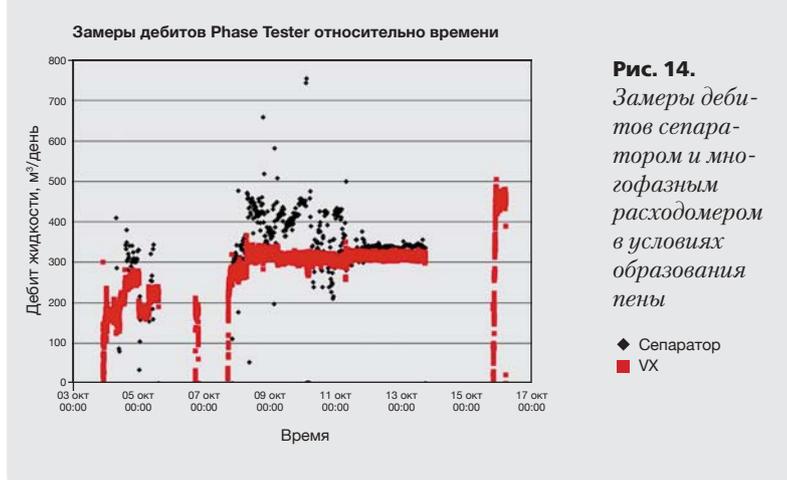


Рис. 14. Замеры дебитов сепаратором и многофазным расходомером в условиях образования пены

в себя тщательный учет PVT свойств флюидов на каждом штуцере, соответственно, отбор на стабилизировавшихся интервалах стабильной работы скважины в условиях термодинамического равновесия и последующий лабораторный анализ. Только наличие полного спектра достоверной информации по температуре, давлению и дебитам в линейных условиях позволяет получить необходимые данные PVT для смеси и провести контроль качества отбора. Достоверная количественная оценка конденсатно-газового фактора (КГФ) может быть достаточно сложной и занимать продолжительное время (с учетом времени на лабораторный анализ), но даже качественная оценка в реальном времени позволяет увидеть характерное поведение скважины, которое остается незаметным в случае применения традиционных подходов. В случае газоконденсатных исследований можно получить данные, которые могут изменить понимание процессов происходящих в газоконденсатной скважине и ближней зоне пласта. На **рис. 11** представлены исследования отработки газоконденсатной скважины прямым ходом. По мере увеличения номинала штуцера можно отметить рост дебитов газа и конденсата (желтая и синяя кривые, соответственно). При этом видно, что стабилизация скважины происходит дольше и не в полной мере на каждом из штуцеров. КГФ (сиреневая кривая) постоянно изменяется и не выходит на постоянное значение, за исключением, возможно, последнего режима. Причиной этому является образование конденсатной банки в ближней зоне пласта, которое может происходить очень быстро при восстановлении давления, сопровождающем закрытие скважины. На первых этапах работ данный факт не учитывался, теперь закрытие скважины при переходе от одного номинала к другому запрещено, а стабилизация дебитов и КГФ в каждом случае проверяется представителем заказчика. Фактически, на каждом из штуцеров осредненная оценка КГФ будет недостоверна. Только правильный выбор стабильных интервалов и сопоставление дебитов в рамках этих интервалов позволяют получить достоверное значение КГФ. Необходимо отметить, что применение традиционных сепараторов в данном случае привело бы к фактическому осреднению дебитов на каждом из штуцеров по всему интервалу работы, что, очевидно, привело бы к значительному завышению КГФ. Только замеры с высоким разрешением по времени позволяют выбрать правильный (стабильный по КГФ) интервал оценки дебитов и их производных.

На сегодняшний день, начиная с 2006 г., было проделано более 100 исследований на газоконденсатных скважинах добывающего фонда Ямала, в том числе проведен ряд сопоставлений с различными устройствами и различными типами сепарационных установок. Полученный набор данных является уникальным и позволяет значительно продвинуться в понимании проблем расходомерии в газоконденсатах и путей их решения.

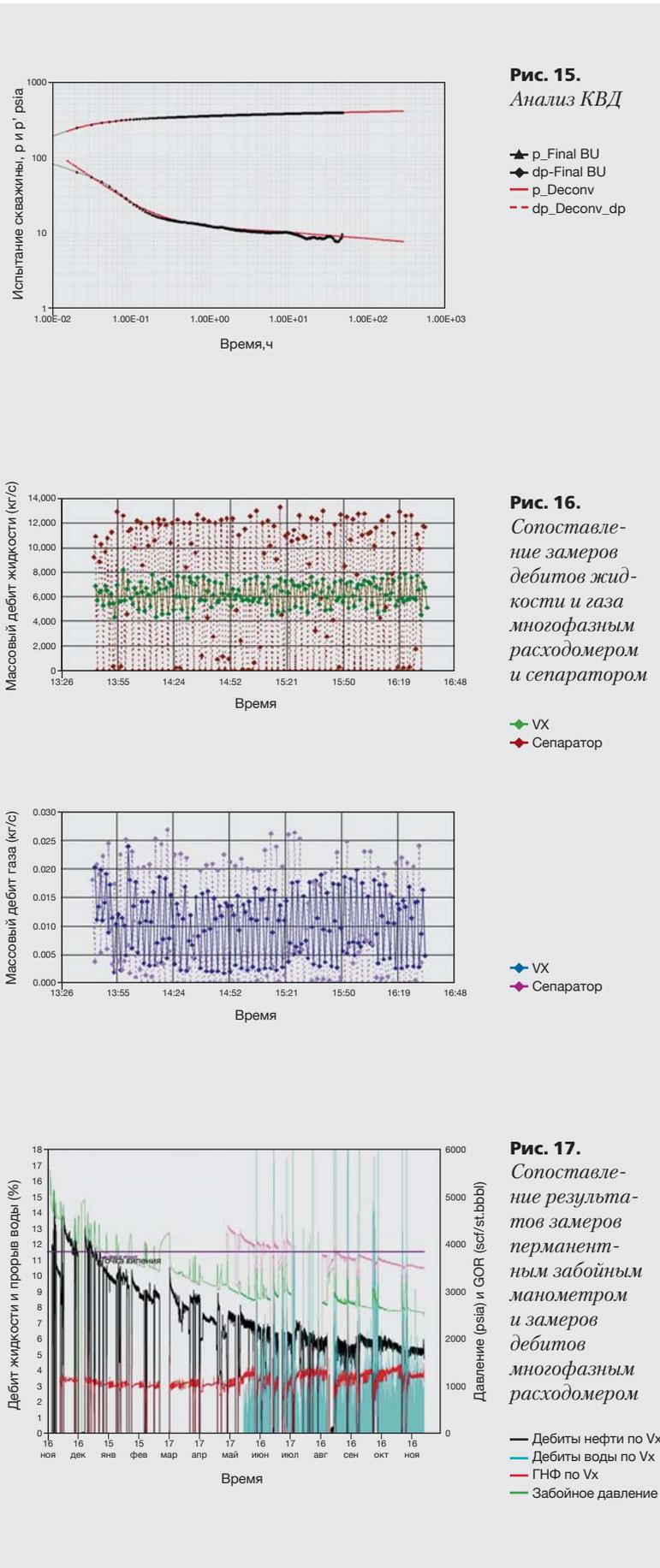
Но даже качественный, а не точный количественный анализ в реальном времени может предоставить очень ценную информацию при работе с газоконденсатными скважинами. **Рис. 12** демонстрирует результаты, полученные при испытаниях разведочной газоконденсатной скважины, где представлены замеры многофазным расходомером (красным) и сепаратором (желтым), дебиты газа - бирюзовым и фиолетовым – конденсата. Обработка скважины производилась прямым и обратным ходом. На графике видно, что по мере увеличения номинала штуцера дебиты газа увеличиваются, что достаточно хорошо фиксируется сепаратором, но дебиты конденсата являются абсолютно нерепрезентативными. Причины заключаются в некачественной сепарации – заниженный или нулевой дебит конденсата и прорывах газа через жидкостной расходомер сепаратора – значительные пики дебитов конденсата, не связанные с изменением режима работы скважины. Использование традиционных сепараторов на газоконденсатных скважинах требует качественного подбора оборудования для данных КГФ (что сложно в случае разведочных скважин) и высокой квалификации и опыта операторов, выполняющих работу.

Результаты замеров дебитов многофазным расходомером позволяют получить более полную картину происходящего - замеры дебитов по газу совпадают с корректными замерами дебита по сепаратору. По мере увеличения номинала штуцера на первых четырех интервалах дебиты газа растут вместе с дебитами конденсата. Затем, при увеличении штуцера, наблюдается значительное отклонение дебита конденсата и его постоянное снижение при стабильном дебите газа. Последующие два шага увеличения номинала штуцера приводят к достаточно сильному изменению дебита газа и практически не влияют на дебит конденсата. На основании этих данных можно сделать вывод о том, что скважина перешла в двухфазный режим работы в пластовых условиях и на забое образуется конденсатная банка. Последующая отработка скважины обратным ходом показывает, насколько сильно

изменилась продуктивность скважины, как по газу, так и по конденсату в результате образования конденсатной банки. Фактически, уже на этапе гидродинамических исследований получена важнейшая информация о режимах эксплуатации скважин в данных условиях. Многофазная расходометрия позволила оценить эффективность работы скважины и допустимые режимы эксплуатации.

Другим достаточно интересным применением многофазных расходомеров является область, в которой замеры традиционными методами не производятся по техническим причинам. Как было сказано выше, сепараторы не позволяют проводить замеры дебитов в процессе очистки скважины, а также при переходе от одного режима к другому. На **рис. 13** представлены замеры дебитов воды (синим), нефти (сиреневым) и газа (желтым) на самом раннем этапе работы скважины после ее открытия. Первая часть графика демонстрирует вынос углеводородной подушки из ствола скважины. Затем дебиты углеводорода резко снижаются, и наблюдается нестабильный вынос газа, нефти и воды. На следующем этапе все дебиты значительно снижаются, работа скважины стабилизируется на достаточно продолжительный период трехфазного потока. Затем, по мере очистки забоя и призабойной зоны скважины от фильтрата бурового раствора, дебиты углеводородов значительно повышаются. Очистка призабойной зоны скважины и вывод ее на режим является важнейшим процессом, который определяет дальнейшую продуктивность скважин. Без многофазной расходометрии этот процесс производился вслепую. Наличие данных высокого разрешения позволяет проводить анализ очистки призабойной зоны, прогнозирование и корректировку дизайна очистки на последующих скважинах. Кроме того, корректная история работы скважины перед записью кривой восстановления давления (КВД) в значительной степени может повысить качество интерпретации ее записи.

Помимо качественного подбора сепараторов и квалификации операторов существуют другие ограничения не позволяющие проводить измерения дебитов традиционными способами. Одним из таких примеров может являться образование пены в сепараторе, которое зависит от свойств углеводородов и воды, их взаимодействия и дебитов работы скважины. На **рис. 14** представлены замеры дебитов многофазным расходомером (красный) и сепаратором (черный). Видно, что данные по замерам дебитов сепаратором не являются представительными и использование их



для интерпретации записанной КВД привело бы к достаточно большим ошибкам или неопределенностям в итоговой интерпретации.

Наличие корректных данных по многофазной расходомерии за весь период испытаний (285 часов) позволяет оптимальным образом использовать всю полученную информацию по давлению и получить корректную интерпретацию финальной КВД (49 часов *рис. 15*) в сложных условиях образования пены на сепараторе.

Другим примером, выходящим за рамки применимости традиционных методов, является измерение дебитов в высоковязкой нефти. Была поставлена задача – провести замеры дебитов в скважинах высоковязкой нефти по технологии SAGD. Фактически, речь идет о битумах, плотность которых 939 кг/м^3 , а вязкость 47 сП при 130 C , $101,325 \text{ кПа}$. На устье скважины такая нефть представляет собой неоднородную пенистую субстанцию, сегрегация которой происходит крайне медленно. Соответственно, замеры дебитов сепаратором не позволяют получить сколько-нибудь качественной оценки дебитов. Тогда как принцип действия многофазного расходомера Vx не требует сепарации флюидов и, основываясь только на данных Вентури и фракциомера, позволяет оценить дебиты в таких сложных условиях. На *рис. 16* представлено сопоставление замеров дебитов жидкости и газа сепаратором и многофазным расходомером. Очевидно, что точность сепаратора в таких условиях не позволяет говорить о сколько-нибудь качественных замерах дебитов. Многофазная расходомерия в высоковязких нефтях – область, где технология Vx хорошо зарекомендовала себя на сегодняшний день. В данном направлении постоянно ведется исследовательская и практическая работа и рамки применимости технологии расширяются все больше и больше.

Помимо классических методов гидродинамических исследований скважин все большую популярность приобретают методы постоянного мониторинга. Перманентные забойные манометры уже давно перестали быть экзотикой. Возможность получить запись давлений за всю историю работы скважины позволяет оценить истощение пласта, вариации продуктивности скважин, получить записи кривых падения и восстановления давления без проведения специальных исследований, фактически, бесплатно. Применение новых методов интерпретации данных, таких, как деконволюция, позволяет использовать полный массив информации по давлению и дебитам скважины для того, чтобы получить интерпретацию гидродинамических

данных с большим радиусом исследования. Расчеты материального баланса также требуют полной информации об истории работы скважины, дебиты всех типов флюидов необходимы для корректных расчетов.

На *рис. 17* приведен пример работы скважины. Зеленым цветом обозначено забойное давление, черным и синим – дебиты нефти и воды, соответственно; красным – ГНФ по результатам замеров многофазного расходомера Vx. В процессе работы скважины наблюдается истощение пласта, соответствующее ему падение забойного давления и дебита нефти. Во второй половине периода исследования начинаются проявления воды, и с течением времени скважина обводняется все больше и больше. Такая подробная информация может использоваться для любого вида расчетов. Идеальным образом подходит для исторической адаптации гидродинамических моделей месторождения и для деконволюционного анализа (в отдельных участках). Качественные замеры дебитов являются ключом к успешности применения деконволюционного анализа.

Заключение

Многофазная расходомерия позволяет проводить замеры дебитов без разделения фаз. Корректная оценка динамики потока на всех этапах испытания и работы скважины является одним из основных достоинств данной технологии. Различные модификации многофазных расходомеров позволяют работать в широком диапазоне дебитов скважин и газовых факторов. Технология успешно развивается в области исследований тяжелых нефтей и газоконденсатов. Применение радиоактивных источников позволяет получить высокое качество замеров для случаев образования эмульсий и пен. Возможность отбора высококачественных устьевых проб в линейных условиях позволяет значительно повысить точность исследований в газоконденсатах и получить качественную лабораторную характеристику добываемого флюида. Применение одной технологии для мобильных и перманентных установок дает возможность легко сравнивать и анализировать данные, полученные различными устройствами. Незначительные потери давления и возможность работать в линию трубопровода значительно увеличивают возможности проведения исследований и снижают экологический ущерб, исключая необходимость отжига при испытаниях. Компактные, недорогие, надежные и легкие в эксплуатации перманентные и мобильные решения используются повсеместно в мире и приобретают все большую популярность. 