

ЭТАЛОНЫ

Научная статья
УДК 620.113+681.121.8
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-13-22>



Эффективный способ воспроизведения потока газожидкостной смеси эталоном расхода

Д. И. Кудусов ✉, К. А. Левин, С. Л. Малышев

Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Казань, Россия
✉ office@vniir.org

Аннотация: Появление на рынке измерительной техники многофазных расходомеров, применяемых в нефтегазодобывающей отрасли промышленности для измерений количества извлекаемых углеводородов непосредственно на скважинах без предварительной сепарации и выполняющих функцию оперативного учета, поставило вопрос их метрологического обеспечения в соответствии с требованиями нормативных документов сферы государственного регулирования в данной области измерений. Его решением было создание эталонной базы, основу которой составили Государственный первичный специальный эталон единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 и поверочная схема средств измерений многофазных расходов, регламентируемая ГОСТ 8.637-2013. При передаче единиц объемного и массового расхода многофазной смеси с требуемой точностью основной проблемой является сложность воспроизведения и поддержания стабильности сразу нескольких параметров потока – массового расхода и содержания жидких компонентов (воды и имитатора нефти) и объемного расхода газовой фазы (воздуха). Необходимо так же учитывать, что программы испытаний в целях утверждения типа средств измерений многофазных потоков, а также методики поверки и калибровки предусматривают смену режимов воспроизведения эталоном расхода газожидкостной смеси, охватывая диапазоны измерений многофазных расходомеров. Применяемые на практике подобные эталоны представляют весьма сложную измерительную систему, состоящую из емкостей хранения компонентов, подающих насосных и компрессорных агрегатов, регулирующей аппаратуры, смесителей и сепараторов, средств измерений физических параметров компонентов многофазного потока и автоматизированной системы управления. Учитывая высокую стоимость многофазных эталонов, при их создании следует применять эффективные методы и способы воспроизведения потока многофазной смеси с заданными параметрами, а также осуществления достаточно быстрого перехода на предусмотренный программой или методикой следующий режим, что позволит сократить время и производственные затраты на процедуру передачи единиц измерений от эталона к рабочему средству измерений.

В настоящей статье описан способ воспроизведения расхода газожидкостной смеси по оригинальной технологической схеме, внедренной при разработке эталона 1-го разряда. Приведены конструктивные решения, повышающие эффективность работы аппарата разделения жидких компонентов для повышения точности дозирования, а также расширяющие диапазон воспроизведения расхода и параметров многофазного потока, обеспечивающие постоянство состава жидкой смеси на заданном режиме. Представлен оригинальный рациональный метод сжатия и поддержания давления газовой фазы, позволяющий быстро переходить на следующий режим, подтверждаемый результатами экспериментальных исследований эталона.

Ключевые слова: газожидкостные смеси, гидроструйный компрессор, эжекторы-диспергаторы, эталон

Ссылка при цитировании: Кудусов Д. И., Левин К. А., Малышев С. Л. Эффективный способ воспроизведения потока газожидкостной смеси эталоном расхода // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 3. С. 13–22. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-13-22>

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 25.09.2024.

MEASUREMENT STANDARDS

Research Article

An Effective Method for Reproducing the Flow of a Gas-Liquid Mixture Using a Flow Standard

Damir I. Kudusov ✉, Kirill A. Levin, Sergey L. Malyshev

VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Kazan, Russia

✉ office@vniir.org

Abstract: The appearance on the market of measuring equipment of multiphase flowmeters used in the oil and gas industry to measure the amount of extracted hydrocarbons directly at wells without preliminary separation and performing the function of operational accounting raised the question of their metrological support in accordance with the requirements of regulatory documents of the sphere of state regulation in this field of measurements. His decision was to create a reference base, the basis of which was the State primary special standard for units of mass flow of gas-liquid mixtures GET 195-2011 and a verification scheme for measuring multiphase flow rates, regulated by GOST 8.637-2013. When transmitting units of volume and mass flow of a multiphase mixture with the required accuracy, the main problem is the difficulty of reproducing and maintaining stability of several flow parameters at once – mass flow and content of liquid components (water and oil simulator) and volume flow of the gas phase. It should also be borne in mind that test programs for the purpose of approving the type of multiphase flow measuring instruments, as well as verification and calibration methods, provide for changing the modes of reproduction of a gas-liquid mixture, covering the measurement ranges of multiphase flowmeters. Such standards used in practice represent a very complex measuring system consisting of storage tanks for components, supply pumping and compressor units, control equipment, mixers and separators, measuring instruments for the physical parameters of multiphase flow components and an automated control system. Given the high cost of multiphase standards, when creating them, effective methods and methods should be used to reproduce the flow of a multiphase mixture with specified parameters, as well as to make a fairly rapid transition to the next mode provided by the program or methodology, which will reduce the time and production costs for the procedure of transferring units of measurement from the standard to the working measuring instrument.

This article describes a method for reproducing the flow rate of a gas-liquid mixture according to the original technological scheme introduced during the development of the 1st category standard. Constructive solutions are presented that increase the efficiency of the liquid component separation apparatus to increase the dosing accuracy, as well as expand the range of reproduction of the flow rate and parameters of the multiphase flow, ensuring the consistency of the composition of the liquid mixture at a given regime. An original rational method of compressing and maintaining the pressure of the gas phase is described, which allows you to quickly switch to the next mode, confirmed by the results of experimental studies of the standard.

Keywords: gas-liquid mixtures, hydrojet compressor, ejectors-dispersers, standard

For citation: Kudusov D. I., Levin K. A., Malyshev S. L. An effective method for reproducing the flow of a gas-liquid mixture using a flow standard. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(3):13–22 (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-13-22>

The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 15.05.2024; accepted for publication 25.09.2024.

Введение

Многофазные расходомеры (МФР) служат для оперативного учета количества добываемых углеводородов непосредственно на скважинах. В целях утверждения типа МФР проходят испытания, периодическую поверку и калибровку на многофазных измерительных

установках и эталонах, в том числе – стационарных и мобильных, согласно Государственной поверочной схеме ГОСТ 8.637-2013¹.

¹ ГОСТ 8.637–2013 Межгосударственный стандарт. Государственная поверочная схема для средств измерений массового расхода многофазных потоков.

Сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется как на рабочие средства измерений, так и на эталоны единиц величин. Опыт активного применения Государственного первичного специального эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011² (далее – первичный эталон) [1] для передачи единиц величин расхода рабочим эталонам, измерительным установкам и средствам измерений МФР к настоящему времени превысил 10 лет и достиг острой необходимости совершенствования первичного эталона. Причиной тому стал узкий диапазон воспроизведения (а) массового расхода жидкой смеси и объемного расхода газа, (б) рабочего давления газожидкостной смеси, существенно влияющего на показатели точности.

В результате выполнения значительного объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по совершенствованию первичного эталона была разработана автономная эталонная установка [2], испытанная и аттестованная в качестве Государственного рабочего эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей 1 разряда в диапазоне значений единицы массового расхода жидкости в составе газожидкостных смесей от 0,01 до 300 т/ч, единицы объемного расхода газа в составе газожидкостных смесей от 0,1 до 10 000 м³/ч (далее – эталон). Таким образом, возможности испытательной базы ВНИИР – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» существенно расширились, что повлечет повышение достоверности измерений расхода и количества добываемых энергетических ресурсов в стратегически важной отрасли промышленности Российской Федерации – нефтегазовой. Главное достижение НИОКР – расширение диапазона воспроизведения расхода газожидкостных смесей, а также повышение максимального давления рабочей смеси до 2,5 МПа. Для получения таких результатов конструкторы-разработчики применили оригинальный способ организации и функционирования узлов и агрегатов, доказавший высокую эффективность работы при сравнительно невысоком потреблении электроэнергии.

В процессе изучения способов повышения давления нагнетаемой газожидкостной смеси [3, 4] особое внимание разработчиков эталона привлек гидроструйный метод, отличающийся высокой производительностью при сравнительно малой степени повышения давления по сравнению с традиционными винтовыми компрессорами. Опыт применения на практике гидроструйных

насосов насчитывает более 100 лет, первые аппараты появились в 20-е годы прошлого века. С тех пор значительно повысилась эффективность их работы, степень повышения напора и коэффициент полезного действия (КПД).

В работе [5] отмечено, что наибольшей эжектирующей способностью обладает эжектор, у которого срез сопла расположен на уровне всасывающего патрубка, что подтверждено стендовыми испытаниями и объяснено с точки зрения физики: 1) выдвинутое к рабочей камере сопло создает дополнительное сопротивление; 2) вынос сопла из устройства ослабляет динамический напор струи. Зарубежные наработки [6–8], позволяющие рассчитать производительность прямоточных эжекторов и получить заданные напорные характеристики, подтверждают высокую эффективность выбранного метода. С учетом всего положительного практического опыта и изучения результатов теоретических и экспериментальных исследований гидроструйных аппаратов была разработана дожимная установка в составе описываемого ниже эталона.

Материалы и методы

Описание эталона

Эталон выполнен по рациональной схеме движения компонентов по замкнутым контурам [9]. Перед началом работы выполняется наддув газовых подушек всех рабочих емкостей эталона до требуемого давления при помощи небольшого компрессора. В дальнейшем компоненты движутся по замкнутому контуру, поступая в смеситель перед измерительной линией и вновь разделяясь после нее. Такая организация процесса минимизирует энергозатраты на прокачку компонентов, так как требует от нагнетательного насосного и компрессорного оборудования лишь компенсации гидравлических потерь, возникающих при прохождении компонентов газожидкостной смеси по трубопроводным магистралям и узлам регулирования. Расход жидких компонентов, подаваемых в смеситель, задается в дозаторе при помощи включения в работу требуемого количества и номенклатуры сопел, и контролируется при помощи кориолисовых расходомеров. Плавная и точная регулировка расхода производится изменением частоты вращения насосов при помощи ПИД-регуляторов. Для обеспечения стабильной работы насосов при малых значениях расхода жидкого компонента (воды или имитатора нефти Eххsol) часть жидкости из соответствующего дозатора по байпасной линии возвращается в бак-сепаратор. Регулировка расхода возвращаемой жидкости выполняется в сопловом блоке дозатора. На соплах срабатывается значительная, а на режимах

² ГЭТ 195–2011 Государственный первичный специальный эталон единицы массового расхода газожидкостных смесей.

малых расходов даже большая часть напора жидкости, что необходимо для обеспечения слабой зависимости и исключения дрейфа расхода в зависимости от режима течения и соотношения содержания компонентов в измерительной линии.

В смесителе происходит смешивание жидких компонентов между собой и с газом (воздухом), поступающим из дожимной станции через дозатор газа. Расход газа в дозаторе задается набором критических сопел. При большом гидравлическом сопротивлении измерительной линии допускается работа без критического перепада на соплах. В этом случае расход газа контролируется набором ультразвуковых расходомеров ИРВИС РС4 Ультра.

Принцип действия

Двухфазная трехкомпонентная смесь подается в одну из трех измерительных линий, имеющих диаметры проходного сечения 80, 150 и 300 мм. Испытуемый МФР может устанавливаться как в горизонтальном, так и в вертикальном участке соответствующей измерительной линии. Предусмотрена возможность поверки мобильных систем измерения (располагаемых на автомобильном шасси), для чего имеется отвод измерительной линии из лабораторного зала на прилегающую к корпусу площадку. Включение в работу той или иной

измерительной линии выполняется при помощи соответствующих задвижек.

Расположение основных составных элементов эталона показано на рис. 1. После измерительных линий трехкомпонентная смесь поступает в газоотделители 1, где происходит разделение смеси на жидкую и газовую фазы. Жидкая фаза (смесь жидких компонентов) возвращается в сепаратор 3 для разделения, а газ поступает на дожимную установку 2, где его давление повышается на величину потерь в магистралях эталона. На режимах с малым гидравлическим сопротивлением основная часть давления срабатывается на критических соплах дозатора газа, чтобы обеспечить слабую зависимость расхода газа от режима течения в измерительной линии, вплоть до полного исключения такого влияния при критическом истечении газа через сопла дозатора.

На входе в дожимную установку газ проходит очистку от примесей еще в одном сепараторе, задачей которого является отделение имитатора нефти для защиты водяного насоса дожимной установки. Для отвода тепла, выделяемого при работе насосов, перед каждым струйным компрессором установлен теплообменник, выполненный по схеме «труба в трубе».

Система охлаждения теплоносителя, обеспечивающая отвод тепла от жидких теплоносителей в дозаторах воды, а также в дожимной установке, использует

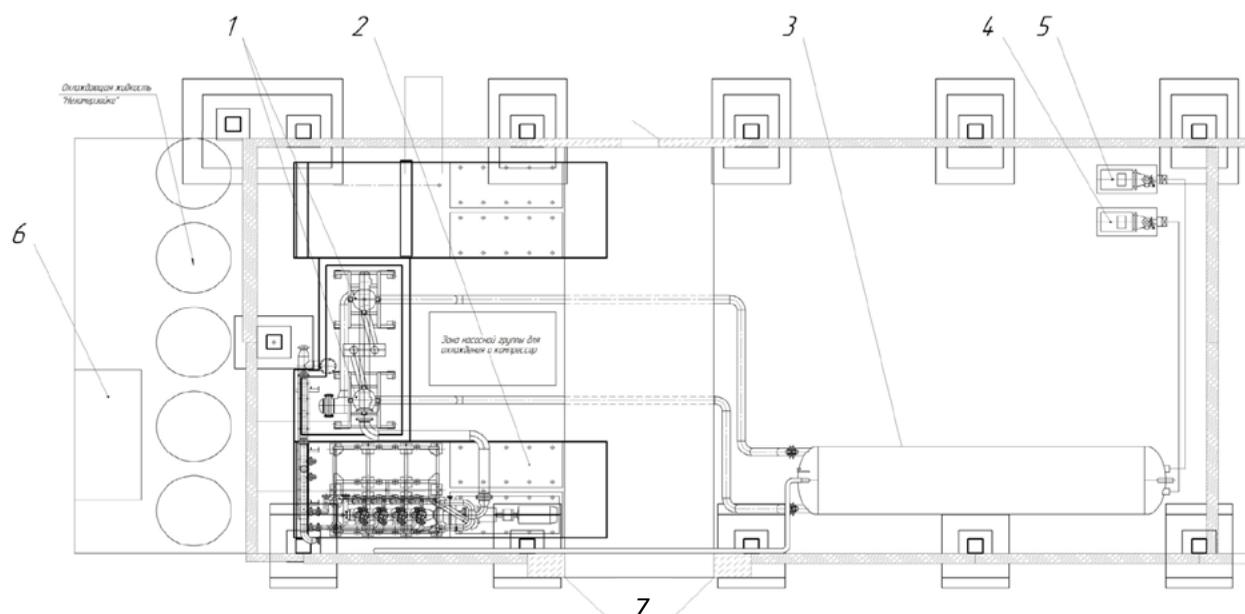


Рис. 1. Схема расположения основных узлов и агрегатов эталона: 1 – газоотделители; 2 – дожимная установка; 3 – сепаратор жидких компонентов; 4 – насос подачи имитатора нефти; 5 – насос подачи воды; 6 – чиллер; 7 – емкости для хранения теплоносителя (этиленгликоля)

Fig. 1. Layout of the main components and units of the standard: 1 – gas separators; 2 – booster system; 3 – liquid component separator; 4 – oil simulant feed pump; 5 – water feed pump; 6 – chiller; 7 – coolant (ethylene glycol) storage containers

в качестве теплоносителя воду. В состав системы охлаждения входит чиллер, гидромодуль для транспортировки охлажденной воды от чиллера к теплообменнику и резервуары с захлажденной водой. В качестве теплоносителя в чиллере используется хладагент R410A, а в гидромодуле – смесь воды с этиленгликолем.

Технологические емкости с водой и Eххsol для компенсации изменений уровней жидких компонентов в баке-сепараторе служат для стабилизации работы сепаратора в периоды выхода на режим. Эти емкости с запасами воды и Eххsol находятся на втором уровне – выше бака-сепаратора. На предварительном этапе в бак-сепаратор заливаются вода и Eххsol до номинальных уровней. После открытия кранов между баком-сепаратором и насосами подачи компонентов определенные количества жидкостей уходят в тракты. Открытием кранов между технологическими емкостями и баком-сепаратором и последующим переливом (самотеком) жидкостей из емкостей уровня компонентов в баке-сепараторе восстанавливаются. После достижения номинальных уровней краны закрываются. Следующая операция по компенсации уровней проводится сразу после включения насосов подачи компонентов на рабочий участок установки. При этом дозирующие сопла открываются таким образом, чтобы массовые расходы воды и Eххsol в рабочем участке имели значения, равные средним величинам из исследуемого диапазона в данном цикле работ. Восстановление уровней компонентов в баке-сепараторе с использованием жидкостей из технологических емкостей проводится при заполненных трактах эталонной установки. После проведения работ «излишки» компонентов

из бака-сепаратора возвращаются в технологические емкости с использованием избыточного давления в баке-сепараторе.

Установка имеет в своем составе блоки очистки жидких компонентов, которая производится при неработающей установке. Для обеспечения сжатым воздухом пневмоприводов дисковых затворов, регулирующих включение в работу теплообменников, сопел и др. элементов установки, служит технологический компрессор.

Для перекачки газа применена высокоэффективная гидроструйная дожимная установка (рис. 2), состоящая из четырех струйных дожимных компрессоров. В качестве эжектирующей жидкости в струйных компрессорах используется вода, циркулирующая по замкнутому контуру при помощи насоса, повышающего рабочее давление воды на 1 МПа. Предварительное отделение газа (воздуха) от воды на выходе струйного компрессора происходит в специальном баке, вода из которого поступает во всасывающую магистраль насоса, а газ высокого давления – в сепаратор, откуда идет на следующую ступень сжатия или через дозаторы газа непосредственно в смеситель.

Каждый из водоструйных компрессоров состоит из комбинации струйного эжектора с баком-газоотделителем (рис. 3). В дожимной установке используется насос KSB RPH S1 150–280A, соответствующий стандарту API610 (тяжелые условия работы). Максимальное давление на входе в насос составляет 30 бар, давление на выходе из насоса – 40,9 бар, допустимое рабочее давление – 56,7 бар, номинальная частота вращения насоса – 2986 об/мин, номинальная потребляемая мощность – 129,72 кВт, максимальный расход – 500 м³/ч.



Рис. 2. Дожимная установка и газоотделитель в составе эталона

Fig.2. Booster unit and gas separator as part of the standard

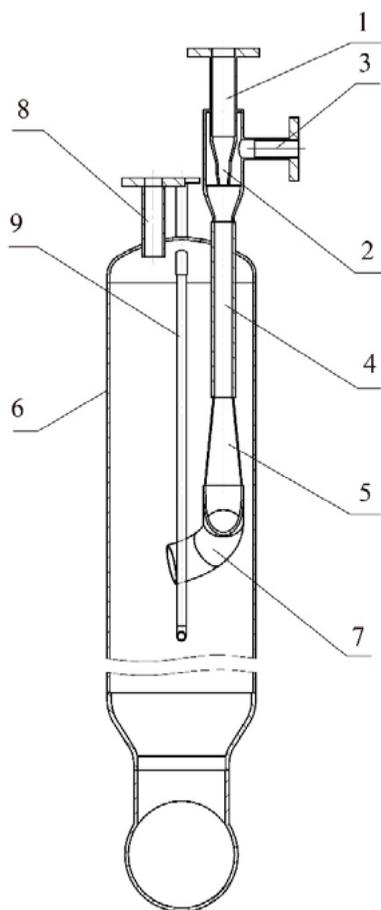


Рис. 3. Схема водоструйного компрессора с газоотделителем: 1 – корпус; 2 – сопло эжектора; 3 – патрубок подвода газа; 4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – бак-газоотделитель; 7 – направляющий патрубок подвода смеси; 8 – патрубок отвода газа; 9 – регулятор уровня жидкости

Fig. 3. Hydrojet compressor with a gas separator diagram: 1 – body; 2 – ejector nozzle; 3 – gas supply tube; 4 – mixing chamber; 5 – diffuser; 6 – gas separator tank; 7 – mixture supply directing tube; 8 – gas transfer tube; 9 – liquid level regulator

Рабочая жидкость (вода) поступает от насоса в корпус 1 струйного эжектора, откуда направляется через сопло в цилиндрическую камеру 4. При этом создается разрежение, благодаря которому через боковой патрубок 3 подсасывается газ (воздух) и полученная газожидкостная смесь, пройдя через диффузор 5, служащий для повышения степени сжатия, поступает в патрубок 7. Конструкция патрубка имеет форму, обеспечивающую тангенциальное направление течения газожидкостной смеси в цилиндрическом баке-газоотделителе 6, способствующее эффективному разделению газовой фазы от жидкой. Между магистралями подвода и отвода

газа имеется байпасная линия с клапаном, при открытии которого снижается расход, направляемый в дозаторы газа.

Подобные установки имеют более низкий коэффициент полезного действия по сравнению с обычным компрессором, но при малой степени повышения давления, необходимой для функционирования эталона, этот недостаток практически нивелируется. Кроме того, серийных компрессоров на требуемую производительность при малой степени повышения давления (отношение давления на выходе к давлению на входе на большинстве режимов работы требуется не более 1,1) не выпускается. Имеющиеся компрессоры на заданную производительность весьма габаритны и дорогостоящи, сложны в регулировании уровня давления и напора, требовательны к чистоте газа на входе, имеют сравнительно малый ресурс работы. Гидроструйные дожимные установки базируются на серийных водяных насосах, надежны и просты в регулировании, при малой степени сжатия имеют соизмеримый с классическим компрессором КПД.

Производительность водяного насоса рассчитана из условия компенсации гидравлических потерь, возникающих при прохождении газовой фазы по замкнутому контуру, включая потери в дозаторе, смесителе, газоотделителе по длине трубопроводов и местных сопротивлений (запорной арматуры, поворотов и др.)

Методика исследования

Теоретический расчет гидравлического сопротивления для двухфазных течений является довольно сложной задачей. Разные методики, полученные в основном обобщением эмпирических данных, могут давать различные результаты. Оценка гидравлических потерь в измерительной линии проведена по методике, приведенной в работах [10, 11], для суммарной максимальной производительности насосов рабочих жидкостей, составляющей 300 т/ч, и объемному расходу газа при рабочих условиях 2,5 МПа, соответствующему 400 м³/ч.

Согласно выбранной методике, перепад давления на единицу длины определяется по соотношениям, полученным обобщением экспериментальных данных:

$$\Delta P/L = \Phi_{ж}^2(\Delta P/L)_{ж} = \Phi_{г}^2(\Delta P/L)_{г}, \quad (1)$$

где $(\Delta P/L)_{ж}$ и $(\Delta P/L)_{г}$ – потери давления на 1 м трубопровода длиной L м в случае движения одной лишь жидкости и одного только газа при той же скорости, температуре и давлении двухфазного потока. Величины $\Phi_{ж}$ и $\Phi_{г}$ называются коэффициентами двухфазности и определяются по эмпирическим графикам [11]. Для

заданного режима суммарный объемный расход двухфазной смеси:

$$Q = Q_{\Gamma} + Q_{\text{ж}} = 700 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,194 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

Отсюда скорость потока при диаметре трубопровода $d = 0,15 \text{ м}$:

$$U = 4Q/(\pi d^2) = 11 \text{ м/с}. \quad (3)$$

Для потока воды с этой скоростью число Рейнольдса:

$$Re_{\text{ж}} = Ud/\nu = 12 \cdot 0,15/10^{-6} = 1,8 \cdot 10^6. \quad (4)$$

Соответственно коэффициент гидравлических потерь:

$$\zeta_{\text{ж}} = 0,3164/Re_{\text{ж}}^{0,25} = 0,0086. \quad (5)$$

С учетом этого потери давления для жидкости составят:

$$\begin{aligned} (\Delta P/L)_{\text{ж}} &= \zeta_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} U^2 / 2d = 0,0086 \cdot 10^3 \cdot \\ &\cdot 11^2 / (2 \cdot 0,15) = 3470 \text{ Па/м}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для потока газа (воздуха) со скоростью $U = 11 \text{ м/с}$ число Рейнольдса:

$$Re_{\Gamma} = Ud/\nu = 11 \cdot 0,15/1,5 \cdot 10^{-5} = 1,1 \cdot 10^5. \quad (7)$$

Соответственно коэффициент гидравлических потерь

$$\zeta_{\Gamma} = 0,3164/Re_{\Gamma}^{0,25} = 0,0174. \quad (8)$$

Тогда при плотности газа при 2,5 МПа $\rho_{\Gamma} = 31,25 \text{ кг/м}^3$:

$$\begin{aligned} (\Delta P/L)_{\Gamma} &= \zeta_{\Gamma} \rho_{\Gamma} U^2 / 2d = 0,0174 \cdot 31,25 \cdot 11^2 / \\ &(2 \cdot 0,15) = 219 \text{ Па/м}. \end{aligned} \quad (9)$$

Отсюда следует:

$$[(\Delta P/L)_{\text{ж}} / (\Delta P/L)_{\Gamma}]^{0,5} = (3470/219)^{0,5} = 4,0. \quad (10)$$

Из эмпирических графиков [33] находим $\Phi_{\text{ж}} = 2$ и $\Phi_{\Gamma} = 8$.

Таким образом, гидравлическое сопротивление канала для газожидкостного потока

$$\Delta P/L = \Phi_{\text{ж}}^2 (\Delta P/L)_{\text{ж}} = 2^2 \cdot 3470 = 13880 \text{ Па/м} \quad (11)$$

или

$$\Delta P/L = \Phi_{\Gamma}^2 (\Delta P/L)_{\Gamma} = 8^2 \cdot 219 = 14016 \text{ Па/м}. \quad (12)$$

Как видно, обе оценки дают примерно одинаковый результат. С учетом конструктивных размеров возьмем максимальную величину гидравлического сопротивления, и для трубопровода длиной $L = 20 \text{ м}$ потери давления составят:

$$\begin{aligned} \Delta P &= (\Delta P/L) \cdot L_{\text{тр}} = 14016 \cdot 20 = \\ &= 280320 \text{ Па} = 2,77 \text{ бар}. \end{aligned} \quad (13)$$

Проверка конструктивных решений

При проектировании дожимной установки была поставлена цель повышения давления рабочей газожидкостной смеси на соответствующую величину для компенсации расчетных потерь и устойчивой работы эталона при максимальных расходах. Для проверки правильности конструктивных решений была проведена серия экспериментальных исследований на модельной гидроструйной установке, по результатам которых принято решение об изготовлении блока, состоящего из четырех компрессоров.

Приемочные испытания эталона показали стабильность его работы во всем заявленном диапазоне воспроизведения расхода газожидкостной смеси (рис. 4).

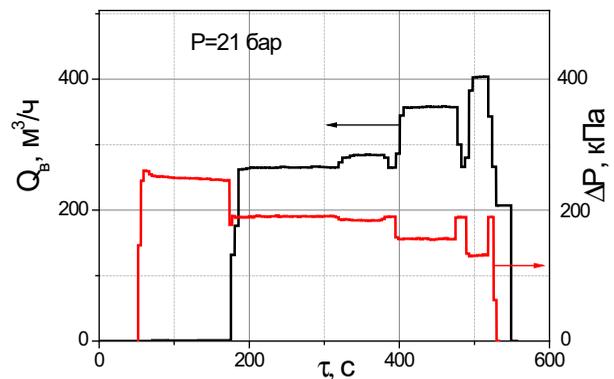


Рис. 4. Параметры работы эталона в течение времени
Fig.4. Parameters of the standard operation during the time

Сепаратор был разработан с учетом рекомендаций, приведенных в работе [12], предназначен для разделения жидких компонентов газожидкостной смеси, а также для хранения (совместно с газоотделителем) сжатого газа, выполнен по оригинальной конструкции. Расположение основных элементов с условно снятой обечайкой бака показано на рис. 5.

Бак-сепаратор выполнен в виде емкости цилиндрической формы с эллиптическими днищами, имеет следующие характеристики:

- длина 9815 мм;
- внутренний диаметр 1891 мм;
- общий объем 26,68 м³;
- толщина обечайки бака 18 мм;
- сварная конструкция из нержавеющей стали удовлетворяет ПБ 03-576-03 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

Процесс разделения в сепараторе происходит следующим образом. Смесь жидких компонентов через два трубопровода 1 с диффузорными выходами 2 поступает в центральный отсек бака-сепаратора.

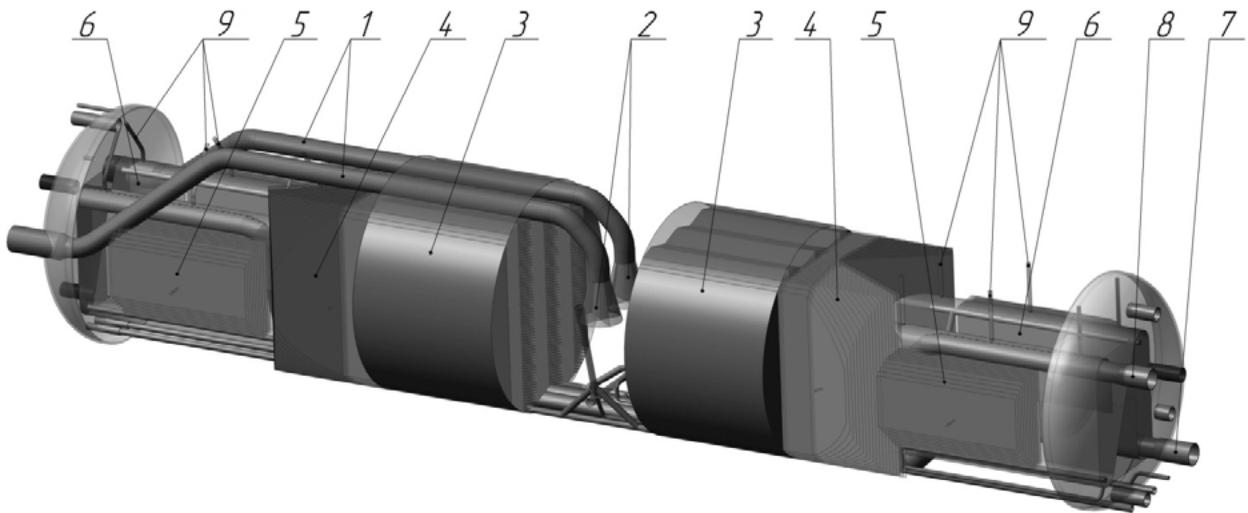


Рис. 5. Сепаратор жидких компонентов в разрезе: 1 – трубы подвода смеси; 2 – выходные диффузоры труб подвода смеси; 3 – коалесцирующие устройства; 4 – успокоители потока смеси; 5 – успокоители потоков компонентов; 6 – заборные устройства компонентов; 7 – труба забора воды; 8 – труба забора Exxsol; 9 – трубки связи полостей заборных устройств с газовой подушкой

Fig. 5. Liquid component separator in section: 1 – mixture supply tubes; 2 – outlet diffusers of mixture supply tubes; 3 – coalescers; 4 – mixture flow stabilizers; 5 – component flow stabilizers; 6 – component intake devices; 7 – water intake tubes; 8 – Exxsol intake tube; 9 – tubes connecting the cavities of the intake devices with the gas cushion

На диффузорах устанавливаются решетки для обеспечения безотрывного режима течения и уменьшения гидравлических потерь. Из центральной части бака смесь двумя потоками направляется в два коалесцирующих устройства 3. Такое разделение смеси на два потока с одинаковым расходом позволяет снизить скорости в баке в два раза для успокоения и более быстрого расслоения смеси. Коалесцирующие устройства 3 представляют собой щелевые каналы «ёлочного» вида в поперечном сечении, на гребнях которых под действием архимедовых сил собираются струи Exxsol, а во впадинах – струи воды.

После выхода из коалесцирующих устройств потоки попадают в соответствующие успокоители потоков смеси 4, где происходит всплытие струй Exxsol и осаждение струй воды. Успокоители представляют собой вертикальные щелевые каналы по всей высоте жидкости в баке. Ширина щелей подобрана так, чтобы режимы течения смеси и компонентов даже при максимальных расходах оставались ламинарными. При этом избегается турбулизация и перемешивание потоков компонентов.

Непосредственно за успокоителями, в том числе – через успокоители потоков компонентов 5 – Exxsol и вода поступают в два заборных устройства 6. Успокоители потоков компонентов располагаются вдоль заборных устройств и имеют аналогичное

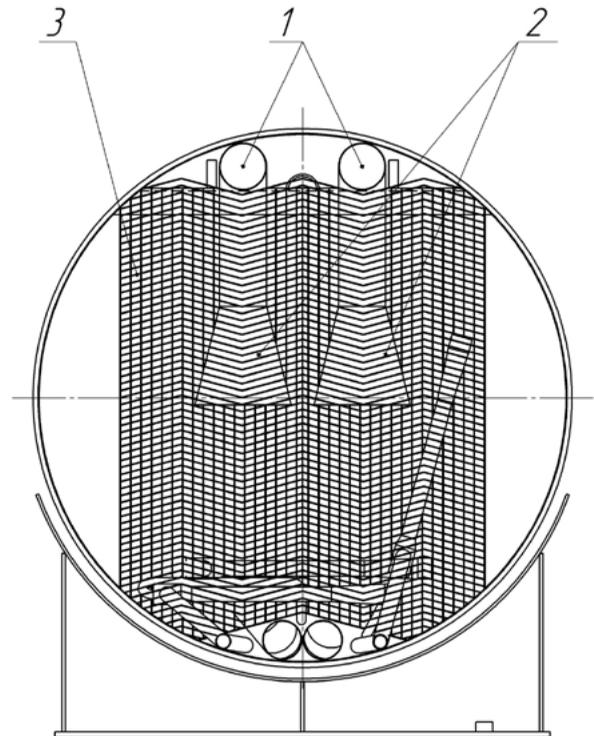


Рис. 6. Коалесцирующие устройства в поперечном разрезе: 1 – трубы подвода; 2 – выходные диффузоры; 3 – щелевые каналы

Fig. 6. Coalescers in cross section: 1 – supply tubes; 2 – outlet diffusers; 3 – slot-shaped channels

назначение – предотвращают турбулизацию потоков компонентов смеси вдоль поверхности их раздела. Заборные устройства имеют И-образную форму, верхние точки полостей которых связаны с газовой подушкой бака через «дыхательные» трубки 9 с целью удаления из них воздушных (газовых) пробок в начале работы. В верхние полости поступает легкий компонент смеси Eххsol, в нижние – вода. Из нижней части по трубе 7, проходящей через оба устройства, вода забирается насосом, находящимся за пределами сепаратора. Труба 7 в пределах заборных устройств имеет ряд отверстий вдоль нижней образующей для забора воды. В верхних точках этой трубы просверлены несколько отверстий малого диаметра для выпуска воздушной (газовой) пробки из трубы в процессе заполнения бака жидкостями. Аналогичным образом по трубе 8 из верхних полостей соответствующим насосом забирается Eххsol. Забор Eххsol из заборного устройства производится через ряд отверстий вдоль верхней образующей трубы 8.

Результаты и обсуждение

Главный результат работы – созданная автономная эталонная установка с диапазонами воспроизведения массового расхода жидкой смеси – до 300 т/ч, объемного расхода газа – до 10 000 м³/ч.

Оригинальная конструкция дожимной установки при сравнительно небольших финансовых затратах на изготовление и эксплуатационные расходы на энергопотребление обеспечивает стабильность параметров расхода и содержания компонент газожидкостной смеси, показала высокую эффективность.

Входящая в состав уникальная сепарационная установка интенсифицирует процесс разделения жидких компонентов смеси, обеспечивая полноту сепарации и повышая точность их дозирования.

Заключение

Установка существенно увеличивает возможности эталонной базы ВНИИР, как следствие – повышается уровень достоверности измерений, проводимых компаниями при добыче углеводородного сырья – нефти, газа и газового конденсата. С принятием в эксплуатацию описанной в статье установки улучшается система государственного контроля количества извлекаемых нефти и газа. Одновременно повышается качество мониторинга экологической обстановки на месторождениях.

Вклад соавторов: Kudusov D. I. – проведение исследовательских работ; Levin K. A. – осуществление формального анализа, написание статьи, подготовка и создание визуальных материалов; Malyshev S. L. – осуществление анализа результатов исследований.

Contribution of the authors: Kudusov D. I. – conducting research; Levin K. A. – formal analysis, writing a draft of the article, research work, preparing and creating visual materials; Malyshev S. L. – analysis of research results.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи.

Conflict of interest: The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest related to the content of this article.

Финансирование: Данное исследование выполнено в рамках проведения опытно-конструкторских работ при финансовой поддержке Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Funding: This research was carried out as part of development work with the financial support of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка и создание Государственного первичного специального эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 / В. Г. Соловьев [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 3. С. 32–38.
2. Kudusov D. I., Malyshev S. L. Совершенствование Государственного первичного специального эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2021. № 3(572). С. 55–58.
3. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем / изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Энергия, 1976. 296 с.
4. Лямаев Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки. Л. : Машиностроение. 1988. 256 с.
5. Мустафаев А. М., Гутман Б. М. Гидроциклоны в нефтедобывающей промышленности. М. : Недра, 1981. 260 с.
6. Panevnyk D. A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process // Nafta-Gaz. 2021. № 9. P. 579–586. <https://10.18668/NG.2021.09.02>
7. Panevnyk D., Krehel' R. Investigation of the characteristics of an oil jetpump when using a group ground drive // Journal of Engineering Research. 2023. Vol. 11, Iss. 1. P. 100004. <https://10.1016/j.jer.2023.100004>

8. Study on effective phase interfacial area at different injection angles of hydro-jet cyclone / L. Wang [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2024. Vol. 284. P. 119336. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119336>
9. Устройство воспроизведения расходов газожидкостных потоков : Пат. 200842 РФ ; заявл. 09.10.2019; опубл. 13.11.2020, Бюл. № 32. 7 с.
10. *Идельчик И. Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. : Машиностроение, 1992. 676 с.
11. *Лабунцов Д. А., Ягов В. В.* Механика двухфазных систем. М. : Издательство МЭИ, 2000. 374 с.
12. *Гельперин Н. И.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1981. 812 с.

REFERENCES

1. Soloviev V. G., Varsegov V. L., Malyshev S. L., Petrov V. N. Development and creation of state primary special standard of a mass flow-rate unit of GET 195-2011 gas-liquid mixtures. *Vestnik of KNRTU n. a. N. Tupolev*. 2013;3:32–38. (In Russ.).
2. Kudasov D. I., Malyshev S. L. Improvement of the State primary special standard for the unit of mass consumption of gas-liquid mixtures GET 195-2011. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti*. 2021;3(572):55–58. (In Russ.).
3. Kutateladze S. S., Styrikovich M. A. Hydrodynamics of gas-liquid systems. 2nd ed. Moscow: E'nergiya; 1976. 296 p. (In Russ.).
4. Lyamaev B. F. Hydraulic jet pumps and installations. Leningrad: Mashinostroenie; 1988. 256 p. (In Russ.).
5. Mustafaev A. M., Gutman B. M. Hydrocyclones in the oil industry. Moscow: Nedra; 1981. 260 p. (In Russ.).
6. Panevnyk D. A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021;9:579–586. <https://10.18668/NG.2021.09.02>
7. Panevnyk D., Krehel' R. Investigation of the characteristics of an oil jetpump when using a group ground drive. *Journal of Engineering Research*. 2023;11(1):100004. <https://10.1016/j.jer.2023.100004>
8. Wang L., Liu W., Yang P., Chang Y., Duan X., Xiao L. et al. Study on effective phase interfacial area at different injection angles of hydro-jet cyclone. *Chemical Engineering Science*. 2024;284:119336. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119336>
9. Kudasov D. I. Device for reproducing gas-liquid flow rates. Patent RF, no. 200842. (In Russ.).
10. Idelchik I. E. Handbook of hydraulic resistance. Moscow: Mashinostroenie; 1992. 676 p. (In Russ.).
11. Labuntsov D. A., Yagov V. V. Mechanics of two-phase systems. Moscow: Izdatel'stvo MEI; 2000. 374 p. (In Russ.).
12. Gelperin N. I. The main processes and devices of chemical technology. Moscow: Ximiya; 1981. 812 p. (In Russ.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ГОСТ 8.637-2013 Межгосударственный стандарт. Государственная система единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений массового расхода многофазных потоков = State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification schedule of multiphase flow measuring tools. М. : Стандартинформ, 2014. 6 с.

ГЭТ 195-2011 Государственный первичный специальный эталон единицы массового расхода газожидкостных смесей / Институт-хранитель ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. 2012. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397881> (дата обращения: 25 сентября 2024 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кудусов Дамир Исавильевич – ведущий инженер ВНИИР – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
420088, Россия, Республика Татарстан, г. Казань,
ул. 2-я Азинская, 7а
e-mail: office@vniir.org

Левин Кирилл Александрович – начальник отдела метрологического обеспечения средств и систем измерений расхода и количества сырой нефти и газожидкостных потоков, ВНИИР – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
420088, Россия, Республика Татарстан, г. Казань,
ул. 2-я Азинская, 7а

Малышев Сергей Львович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ВНИИР – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
420088, Россия, Республика Татарстан, г. Казань,
ул. 2-я Азинская, 7а

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Damir I. Kudasov – Leading Engineer VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology
7a 2nd Azinskaya st., Kazan, Republic of Tatarstan, 420088, Russia
e-mail: office@vniir.org

Kirill A. Levin – Head of the Department of Metrological Support of Means and Systems for Measuring the Flow Rate and Quantity of Crude Oil and Gas-Liquid Flows, VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology
7a 2nd Azinskaya st., Kazan, Republic of Tatarstan, 420088, Russia

Sergey L. Malyshev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology
7a 2nd Azinskaya st., Kazan, Republic of Tatarstan, 420088, Russia