

## ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ МАССОВОГО РАСХОДА ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ

**В.Н. Петров<sup>1</sup>**, **В.Ф. Сопин<sup>2</sup>**, **Л.А. Ахметзянова<sup>1</sup>**, **Я.С. Петрова<sup>2</sup>**, **О.В. Илюшин<sup>3,4</sup>**  
(<sup>1</sup>ВНИИР – филиал ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", <sup>2</sup>ФГБОУ ВО "КНИТУ",  
<sup>3</sup>ФГБОУ ВО "Казанский государственный энергетический университет",  
<sup>4</sup>ФГАОВУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный университет")

В статье показана возможность создания на основе принципов физического подобия эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей (ГЖС) в соответствии с требованиями государственных стандартов. Проведен анализ неучтенной систематической погрешности, образующейся на многофазном испытательном стенде и эталоне единицы массового расхода ГЖС. Представлены наиболее часто встречающиеся недоработки технологических аппаратов, входящих в схему эталонов единицы массового расхода ГЖС, переводящие эталон в многофазный испытательный стенд.

**Ключевые слова:** моделирование; подобие; газожидкостный поток; неучтенная систематическая погрешность; многофазный испытательный стенд; эталон; технологические аппараты.

### THE STANDARD UNIT MASS FLOW RATE OF GAS-LIQUID MIXTURES

**V.N. Petrov<sup>1</sup>**, **V.F. Sopin<sup>2</sup>**, **L.A. Akhmetzyanova<sup>1</sup>**, **Ya.S. Petrova<sup>2</sup>**, **O.V. Ilyushin<sup>3,4</sup>**  
(<sup>1</sup>VNIIR – Affiliated Branch of the D.I. Mendeleev Institute for Metrology, <sup>2</sup>Kazan National Research Technological University,  
<sup>3</sup>Kazan State Power Engineering University, <sup>4</sup>Kazan (Privolzhsky) Federal University)

For the first time, using the principles of physical similarity, the possibility of creating a standard unit of mass flow rate of gas-liquid mixtures in accordance with the requirements of state standards is shown. The unaccounted systematic error generated at the multiphase test bench and the standard unit of mass flow rate of a gas-liquid mixture is analyzed. The most common shortcomings of technological devices developers are presented, which are included in the scheme of the unit of mass flow rate of gas-liquid mixtures that transfer the standard into a multiphase test bench.

**Keywords:** modeling; similarity; gas-liquid flow; unaccounted systematic error; multiphase test bench; standard; technological devices.

Сегодня на рынке появились многофазные расходомерные системы нового типа – многофазные расходомеры (МФР). Созданные для работы на нефтяных платформах, они с успехом используются на скважинах и лицензионных участках. Многофазный расходомер стал ключевым инструментом благодаря возможности его применения в эксплуатационной линии в качестве стационарного устройства мониторинга и контроля. Полученные данные могут использоваться для оценки производительности отдельной скважины и позволяют улучшить контроль ресурсов, что, в свою очередь, способствует уменьшению падения добычи или повышает прогнозируемую добычу на месторождении.

Внедрение в эксплуатацию МФР, в свою очередь, потребовало создания установок для их исследования и испытания, калибровки, поверки. За рубежом созданы многофазные испытательные стенды (МИС) [1], а в России – Государственный первичный специальный эталон единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 и рабочие эталоны (эталон) [2]. Чем отличается многофазный испытательный стенд от эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей?

В соответствии с ГОСТ Р 8.885-2015 "ГСИ. Эталоны. Основные положения", эталон должен обладать тремя взаимосвязанными свойствами: воспроизведе-

ние, хранение (неизменность) и передача единиц величин. С целью реализации этих свойств на эталоне необходимо понимать сущность физических процессов, лежащих в основе методов воспроизведения и реализации неизменности трехкомпонентного газожидкостного потока. Рассмотрим в общих чертах этот вопрос применительно к эталонам единицы массового расхода газожидкостных смесей (ГЖС). Надо заметить, что от работы всех блоков, входящих в схему эталона: технологических аппаратов, расходомеров, конфигурации магистрали, датчиков, приборов, запорных узлов, зависит воспроизводимость и неизменность газожидкостного потока. Сегодня, к сожалению, отсутствуют рекомендации метрологических институтов о разработке эталонов. Этим фактом можно объяснить отсутствие идентичных эталонов, следовательно и неучтенная систематическая погрешность [3] у всех разная, а значит, будут отличаться и фактические метрологические характеристики.

К МИС никаких требований к неизменности ГЖС для учета систематической погрешности не предъявляется. Обычно на первом этапе происходит воспроизведение из нефти (имитатора нефти) и воды жидкой смеси, которую затем направляют по магистрали в аппарат перемешивания с газовой фазой, и, наконец, ГЖС поступает на исследуемый МФР. Однако экспериментально-теоретические исследования по струк-

туре течения двухкомпонентной жидкой и газожидкостной смесей показывают, что в потоке происходит его расслоение. Жидкость с большей плотностью опускается вниз трубопровода, а легкий компонент оказывается в верхней части трубы. При наличии в смеси газовой фазы она оказывается в верхней части трубопровода. Расслоение потока, в свою очередь, приводит к изменению скорости компонентов, чем плотность меньше, тем ее скорость больше. При расчете метрологических характеристик МИС также необходимо учитывать погрешности, возникающие при сепарации смеси и воспроизведении трехкомпонентной ГЖС. Это приводит к систематической неуточной погрешности [3], что допустимо для МИС.

Свойства эталона о неизменности, воспроизведении двухкомпонентного жидкого и трехкомпонентного газожидкостного потока, как было сказано выше, накладывают определенные требования на его схему и конструкцию технологических аппаратов.

В работе [4] говорится, что современное состояние знаний о структуре течения в канале еще не достигло уровня, при котором не возникло бы сомнений относительно выбора методики эксперимента применительно к какой-нибудь гидродинамической задаче. Слишком часто данные, полученные в независимых исследованиях для предположительно идентичных или почти идентичных гидродинамических задач, не согласуются. Необходимо понимать причины, порождающие такие расхождения, эта проблема стоит наиболее остро для двухфазных течений, но возможна и в простейших гидродинамических ситуациях. При этом сравнения прогнозов, основанных на применении различных моделей турбулентности и сделанных разными исследователями, с экспериментальными данными для той же гидродинамической проблемы представляют собой непростую и неоднозначно решаемую задачу.

Сегодня не существует научно обоснованных методов управления параметрами сред однофазных потоков (жидкость, газ). Неизменность воспроизводимого потока в данных условиях обеспечивается требованиями к основным узлам и средствам измерений, созданием методик их исследований и оценок погрешности, обусловленных воспроизводимым потоком. Поэтому при разработке эталонов массового и объемного расходов однофазных сред, когда поток описывается одним критерием Рейнольдса и является автомодельным, от разработчика требуется понимание физических процессов, проходящих в технологических аппаратах, входящих в их схему.

Из сказанного выше следует, что реализовать воспроизведение и неизменность газожидкостного потока, состоящего из нескольких компонентов, каждый из которых воспроизводит поток рабочей среды со своими физико-химическими свойствами и обладает набором аэрогидродинамических параметров, представляет собой практически невозможную задачу.

В связи с этим рассмотрим вопрос о возможности создания эталона единицы массового расхода

ГЖС в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.885-2015 и ГОСТ 8.381-2009 "ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности".

Поток двухкомпонентной ГЖС описывается критериями гомохронности Рейнольдса и Фруда, а также критерием Вебера.

Критерий Рейнольдса  $Re = \frac{\vartheta r}{\nu}$  (где  $\vartheta$  – скорость потока,  $r$  – радиус канала,  $\nu$  – кинематическая вязкость) характеризует отношение сил трения к силе инерции. Критерий Фруда  $Fr = \frac{\vartheta^2}{gr}$  характеризует отношение между силой инерции и внешней силой.

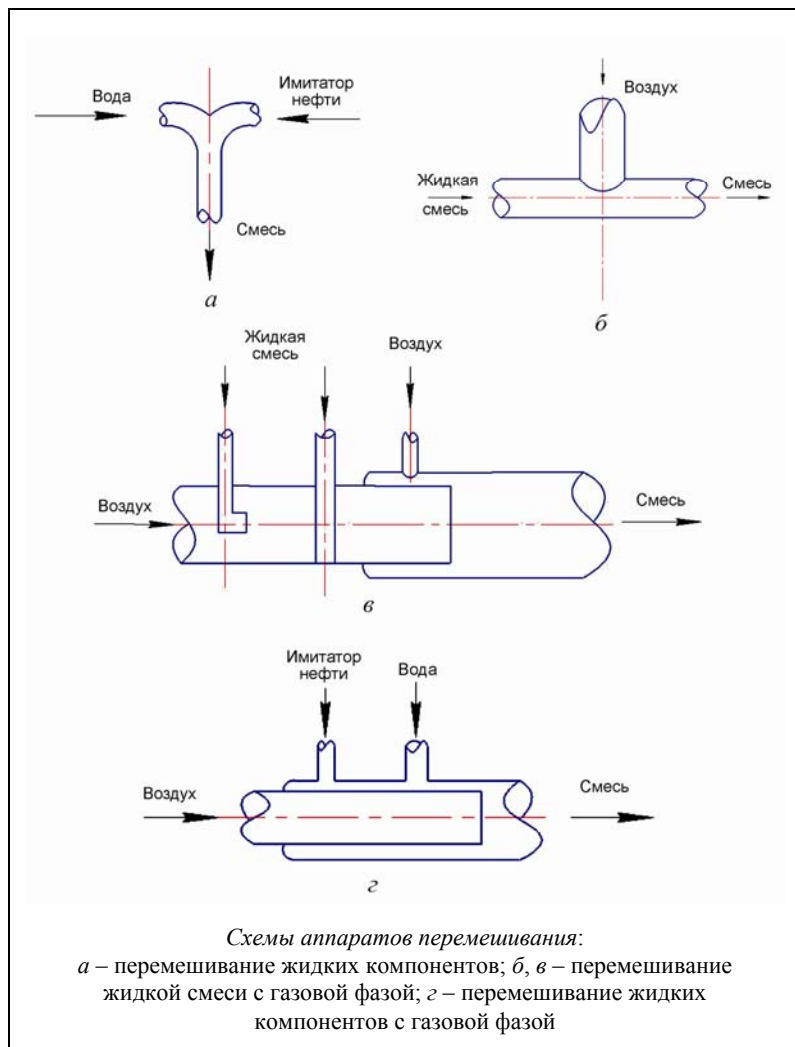
Критерий Вебера  $We = \frac{\vartheta^2 \rho_c D}{\sigma_M}$  (где  $\sigma_M$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе капли сплошной среды,  $D$  – диаметр капли, индекс "с" соответствует сплошной среде) характеризует отношение силы результирующего динамического напора, стремящегося деформировать и разорвать каплю, к силе поверхностного натяжения, оказывающего обратное воздействие.

В магистральных многофазного испытательного стенда и в эталоне единицы массового расхода ГЖС находится трехкомпонентный газожидкостный поток. Для описания этого потока, состоящего из нефти (имитатора нефти), воды и газа, потребуется как минимум 9 критериев.

Рассмотрим вопрос о возможности моделирования данного потока. Прямое физическое моделирование [5, 6] заключается в воспроизведении процесса той же физической природы, что и в образце, но одноименные характеристики процесса изменены, уменьшены или увеличены на некоторый постоянный множитель; два физически подобных явления могут образовывать пару образец – модель, или, другими словами, пару магистраль (или скважина) – эталон. Для полного подобия модели образцу должны быть выполнены следующие требования:

- процесс, воспроизводимый в модели и образце, относится к одному классу физических явлений и оба процесса подчиняются одним и тем же уравнениям;
- геометрически модель подобна образцу;
- безразмерные краевые условия в образце и модели одинаковы, а определяющие критерии подобия имеют одинаковое численное значение.

Прямое моделирование возможно только для процессов, определяемые числа подобия которых являются функцией геометрических параметров системы и одного определяющего критерия, в этом случае течение автомодельно. При трех определяющих критериях возможно приближенное моделирование, но для этого необходимы экспериментальные исследования и разработка математической модели, но не на основе современных численных исследований, а на методах, позволяющих исследовать сложные структуры потока вязкой жидкости конкретных турбулентных течений [6].



зой. Надо заметить, что перемешивание должно состоять в многократном перемешивании макрочастиц объема среды под действием побудителя – струй жидкости насосом, что улучшает эффективность перемешивания, т. е. приводит течение к более беспорядочному и статистически симметричному режиму течения. Такое течение в целом улучшает поверку и калибровку МФР.

Однако при проектировании эталонов единицы массового расхода ГЖС [2] в основном используется одноразовое перемешивание (рисунок), это переводит эталон в многофазный испытательный стенд.

Такое перемешивание увеличивает влияние различных перегибов линий тока на характер течения компонентов.

Как показано в работе [4], одной из причин несоответствия экспериментальных данных, полученных для однофазных идентичных задач, является неоднородность течения в рабочем участке, хотя оно и автономно.

Решения, принимаемые при проектировании технологических аппаратов, во многих случаях не позволяют создать пару образец – модель, а следовательно, смоделировать течение трехкомпонентного газожидкостного потока, образующегося на скважине. Необходимо разработать рекомендации метрологических институтов по проектированию схем эталонных установок и технологических аппаратов, входящих в эти схемы, с целью выполнения требований ГОСТ 8.381-2009.

При проектировании эталонов необходимо:

- разработка сепаратора трехкомпонентной ГЖС;
- разработка аппаратов перемешивания с учетом заявленных технических характеристик;
- выбор типа эталона (открытый или закрытый);
- грамотное, с учетом физико-химических свойств, определение основных технических характеристик эталона;
- определение систематической неуценной погрешности, образующейся на эталоне;
- грамотный анализ приборов, необходимых для контроля параметров газожидкостного потока;
- выбор мест установки приборов контроля параметров газожидкостного потока;
- грамотное, с учетом уменьшения пульсаций компонентов газожидкостного потока, проектирование схем и обвязки технологических аппаратов эталона;
- предусмотреть аппараты по гашению пульсаций.

При разработке эталонов единицы массового расхода ГЖС одной из основных задач является контроль структуры течения как двухкомпонентной жидкой, так и трехкомпонентной ГЖС. Эти мероприятия

Следовательно, наличие трех определяющих критериев существенно осложняет моделирование физического процесса, но позволяет создать пару образец – модель. При четырех критериях подобия моделирование невозможно.

Течение трехкомпонентного газожидкостного потока, как было сказано выше, описывается 9 определяющими критериями, поэтому образовать пару образец – модель (т. е. скважина – эталон) теоретически невозможно, следовательно, можно создать только МИС. Однако исследуемое многофазное течение можно представить в виде, который описывается тремя критериями.

Перемешивание жидких компонентов позволяет создать однородную смесь, и следовательно, поток двухкомпонентной ГЖС, описываемый тремя критериями (Рейнольдса, Фруда и Вебера), и смоделировать пару скважина – эталон. Таким образом, можно сделать следующий вывод: при разработке эталонов единицы массового расхода ГЖС можно образовать пару образец – модель, или скважина – эталон, и физически смоделировать трехкомпонентную ГЖС. В этом случае необходим грамотный подход к разработке аппаратов перемешивания жидких компонентов и жидкой смеси с газовой фа-

позволяют обеспечить неизменность воспроизводимой смеси.

В представленной статье впервые сделана попытка на эталонах создать единую неизменную воспроизводимую единицу массового расхода ГЖС без каких-либо искажений в соответствии с ГОСТ 8.637-2013 "ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массового расхода многофазных потоков", передавать ее нижестоящим по поверочной схеме рабочим эталонам и средствам измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Falcone G., Hewitt G., Alimonti C. *Multiphase Flow Metering: Principles and Applications*. – 1<sup>st</sup> edition. – Elsevier Science, 2009. – 328 p.
2. Сайт Всерос. науч.-исслед. ин-та метролог. службы (ВНИИМС). – URL: [www.vniims.ru](http://www.vniims.ru)
3. *Воспроизведение и передача единицы измерений на эталонах массового расхода газожидкостных смесей* / В.Н. Петров, С.Л. Малышев, С.В. Петров, Л.А. Ахметзянова // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2019. – № 10 (555). – С. 32–38. – DOI: 10.33285/0132-2222-2019-10(555)-32-38
4. Шец Дж. *Турбулентное течение. Процессы вдува и*

*перемешивания* / пер. с англ. Л.В. Соколовской; под ред. В.П. Шидловского. – М.: Мир, 1984. – 247 с.

5. Гухман А.А. *Введение в теорию подобия*. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.

6. Кутателадзе С.С. *Анализ подобия и физические модели*. – Новосибирск: Наука, 1986. – 296 с.

## LITERATURA

1. Falcone G., Hewitt G., Alimonti C. *Multiphase Flow Metering: Principles and Applications*. – 1<sup>st</sup> edition. – Elsevier Science, 2009. – 328 p.
2. Сайт Всерос. науч.-исслед. ин-та метролог. службы (ВНИИМС). – URL: [www.vniims.ru](http://www.vniims.ru)
3. *Воспроизведение и передача единицы измерений на эталонах массового расхода газожидкостных смесей* / В.Н. Петров, С.Л. Малышев, С.В. Петров, Л.А. Ахметзянова // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2019. – № 10 (555). – С. 32–38. – DOI: 10.33285/0132-2222-2019-10(555)-32-38
4. Shets Dzh. *Turbulentnoye techeniye. Protsessy vduva i peremeshvaniya* / per. s angl. L.V. Sokolovskoy; pod red. V.P. Shidlovskogo. – M.: Mir, 1984. – 247 s.
5. Gukhman A.A. *Vvedeniye v teoriyu podobiya*. – 2-e izd., dop. i pererab. – M.: Vysshaya shkola, 1973. – 296 s.
6. Kutateladze S.S. *Analiz podobiya i fizicheskiye modeli*. – Novosibirsk: Nauka, 1986. – 296 s.

**Владимир Николаевич Петров<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

**Владимир Федорович Сопин<sup>2</sup>**, д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой  
e-mail: [sopin@kstu.ru](mailto:sopin@kstu.ru),

**Лейсан Амировна Ахметзянова<sup>1</sup>**, аспирант, ведущий инженер  
e-mail: [leisanvniir@yandex.ru](mailto:leisanvniir@yandex.ru),

**Яна Сергеевна Петрова<sup>2</sup>**, студент

**Олег Владимирович Илюшин<sup>3,4</sup>**, канд. биол. наук, доцент

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт расхо-  
дометрии – филиал Федерального государственного унитарного  
предприятия "Всероссийский научно-исследовательский  
институт метрологии им. Д.И. Менделеева" (ВНИИР – филиал  
ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева")  
420088, РФ, Республика Татарстан, г. Казань, ул. 2-я Азин-  
ская, 7а;  
e-mail: [office@vniir.org](mailto:office@vniir.org);

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования "Казанский национальный  
исследовательский технологический университет"  
(ФГБОУ ВО "КНИТУ")  
420015, РФ, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 68;  
e-mail: [office@kstu.ru](mailto:office@kstu.ru);

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО "Казанский государственный энергетический уни-  
верситет"  
420066, РФ, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красно-  
сельская, 51;

<sup>4</sup>ФГАОУ ВО "Казанский (Приволжский) федеральный универ-  
ситет"  
420008, РФ, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлев-  
ская, 18

**Vladimir Nikolaevich Petrov<sup>1</sup>**, Cand. of tech. sci., leading re-  
searcher

**Vladimir Fedorovich Sopin<sup>2</sup>**, Dr. of chem. sci., Professor,  
Head of the Department  
e-mail: [sopin@kstu.ru](mailto:sopin@kstu.ru),

**Leisan Amirovna Akhmetzyanova<sup>1</sup>**, postgraduate student,  
leading engineer  
e-mail: [leisanvniir@yandex.ru](mailto:leisanvniir@yandex.ru),

**Yana Sergeevna Petrova<sup>2</sup>**, student

**Oleg Vladimirovich Ilyushin<sup>3,4</sup>**, Cand. of biol. sci., associate  
professor

<sup>1</sup>VNIIR – Affiliated Branch of the D.I. Mendeleev Institute  
for Metrology  
7a, Vtoraya Azinskaya str., Kazan, 420088, Republic  
of Tatarstan, Russian Federation;  
e-mail: [office@vniir.org](mailto:office@vniir.org);

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher  
Education "Kazan National Research Technological  
University"  
68, K. Marx str., Kazan, 420015, Republic of Tatarstan,  
Russian Federation;  
e-mail: [office@kstu.ru](mailto:office@kstu.ru);

<sup>3</sup>FSBEI HE "Kazan State Power Engineering University"  
51, Krasnoselskaya str., Kazan, 420066, Republic of Tatarstan,  
Russian Federation;

<sup>4</sup>FSAEI HE "Kazan (Privolzhsky) Federal University"  
18, Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan,  
Russian Federation