

Двтор ер.

М 42

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

*На правах рукописи*

Аспирант В. Ф. МЕДВЕДЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ  
ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ  
ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ НАСАДКИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

Кандидат технических наук,  
доцент  
А. И. ГУЖОВ

Доктор технических наук,  
профессор  
З. И. ГЕЛЛЕР

ОДЕССА — 1967 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

Аспирант В. Ф. МЕДВЕДЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ  
ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ  
ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ НАСАДКИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Принят в печать 1967 г.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

Кандидат технических наук,  
доцент  
А. И. ГУЖОВ

Доктор технических наук,  
профессор  
З. И. ГЕЛЛЕР

ОНАХТ 23.07.12  
Исследование процесс



v001230

v O. B. 1230



ОДЕССА — 1967 г.

Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы аспиранта В. Ф. Медведева «Исследование процесса истечения газожидкостных смесей через цилиндрические насадки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится «    » . . . . . 1967 г.

Ваши отзывы и замечания в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова, № 112, Одесский технологический институт.

Работа выполнена на кафедре эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Грозненского ордена Трудового Красного Знамени нефтяного института.

Ученый секретарь Совета

Л. А. ЗАПОРОЖЕЦ

Истечение смесей жидкости и газа через цилиндрические насадки применяется во многих отраслях техники. В нефтяной и газовой промышленности в связи с широким внедрением прогрессивной системы однетрубного сбора и транспорта нефти и газа возникла необходимость разработки простого и надежного способа измерения расхода смеси непосредственно в потоке. Весьма перспективным представляется способ, основанный на методе переменного перепада давления, создаваемого с помощью цилиндрических насадок.

Истечение газожидкостных смесей через цилиндрические насадки имеет свои особенности, значительно отличающиеся от истечения однофазных потоков, но многие из этих особенностей, как и сам процесс истечения, мало изучены.

Настоящая диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию истечения газожидкостных смесей через цилиндрические насадки с целью установления возможности их использования для измерения расхода смеси.

Работа состоит из введения, шести глав и выводов.

В первой главе приведен краткий литературный обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных истечению газо- и парожидкостных смесей через различного рода сужения — сопла, насадки, диафрагмы.

Анализ этих работ показал, что наиболее актуальными вопросами при изучении истечения двухфазных смесей через насадки и сопла являются:

— установление термодинамических особенностей процесса истечения;

— определение зависимости критических параметров от газосодержания;

— изучение закономерностей изменения скорости истечения в докритическом режиме;

— исследование влияния физических свойств компонентов смеси на процесс истечения.

Если за последние годы значительно увеличилось количество работ по определению критических расходов двухфазных смесей (Лебедев П. Д., Соколовский В. С., Телетов С. Г., Лифшиц А. Г., Шидловский В. П., Фауске, Леви, Тангрэн, Рос, Муди, Старкман и др.), то в докритическом режиме истечения исследований выполнено очень мало (Гурченко А. А., Солдатов Н. Н., Бернел, Мэрдок, Чисхолм, Ватсон), и они не дают ясной картины изменения скорости истечения смеси с изменением газосодержания и перепада давлений.

Большинство данных получено по истечению воздуховодяных и пароводяных смесей. Применение результатов этих исследований к истечению газонефтяных смесей затруднено, поскольку в экспериментах не изучалось влияние физических свойств компонентов на процесс истечения. Проведенные же промысловые исследования (Брискман А. А., Рос, Мэрдок) пока не дают возможности сделать какие-либо конкретные выводы ввиду малого количества опытного материала.

В главе второй дано описание экспериментальной установки, техники измерения и регулирования основных параметров, приведена оценка погрешности измерений и результаты тарировочных опытов.

На лабораторной установке исследовалось истечение через цилиндрические насадки смесей воздуха с жидкостями, различающимися между собой значениями плотности и вязкости. В качестве жидкого компонента смесей применялись: а) вода; б) водный раствор глицерина при различных температурах; в) керосин. Физические свойства жидкостей приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристика жидкостей

Наименование жидкости	Плотность, $кг/м^3$		Вязкость, $сст$	
	при 20°C	при 40°C	при 20°C	при 40°C
Вода . . . . .	1000	—	1	—
Водоглицериновый раствор . . .	1218	1202	53,4	23,5
Керосин . . . . .	811,5	—	3,28	—

Схема установки изображена на рис. 1. Воздух от поршневого компрессора марки ВУ 3/8 поступал в воздухосборник

объемом  $16 \text{ м}^3$ . Работа компрессора была автоматизирована, так что в воздухохборнике поддерживалось давление  $0,7—0,5 \text{ Мн/м}^2$ . Из воздухохборника по трубопроводу воздух подводился к смесителю. Регулятор давления, установленный на выходе из воздухохборника, обеспечивал заданный уровень давления с точностью не менее  $1 \text{ кн/м}^2$ . Давление воздуха измерялось образцовым манометром, а температура — ртутным термометром. Измерение расхода воздуха осуществлялось нормальной диафрагмой с погрешностью менее  $1,2\%$ . При этом автоматическая система регулирования расхода позволяла поддерживать необходимый расход воздуха.

Для подачи жидкости к смесителю установлены расходный бак объемом  $0,6 \text{ м}^3$  и центробежные насосы типа 2К-6. Расход жидкости измерялся двумя независимыми методами—при помощи счетчиков типа СВШ-5 16/40 и нормальной диафрагмой. В установке предусмотрена мерная емкость объемом  $0,1 \text{ м}^3$  для тарировки диафрагм. Суммарная погрешность в измерении расхода жидкости не превышала  $1\%$ . Изменение подачи жидкости в смеситель производилось регулятором расхода.

Исследуемые насадки устанавливались на трубопроводе диаметром  $50,4 \text{ мм}$ , на котором имелась прозрачная вставка для визуального наблюдения структуры потока. Давление газожидкостной смеси до и после насадка измерялось образцовыми манометрами с кольцевым отбором и разделительными сосудами, а температура — лабораторным ртутным термометром.

Сброс газожидкостной смеси производился в горизонтальный сепаратор. Для поддержания уровня жидкости в сепараторе установлен регулятор уровня. Давление воздуха в сепараторе изменялось с помощью регулятора давления.

В опытах использовали тщательно изготовленные латунные насадки с острой входной кромкой. Конусность их не превышала  $0^{\circ}0'4''$ , а расхождение между двумя взаимно-перпендикулярными диаметрами во входном и выходном сечениях было менее  $10 \text{ мк}$ . Диаметр насадков составлял  $9,98; 12; 13,97; 14,95; 15,98$  и  $16,02 \text{ мм}$ , а относительная длина их  $\frac{l}{d} = 4, 5$  и  $12$ .

Изучение структуры потока при истечении проведено на прозрачном участке с насадком  $d = 12 \text{ мм}$ ,  $\frac{l}{d} = 4$ , выполненном из органического стекла.

Задача эксперимента заключалась в определении зависи-

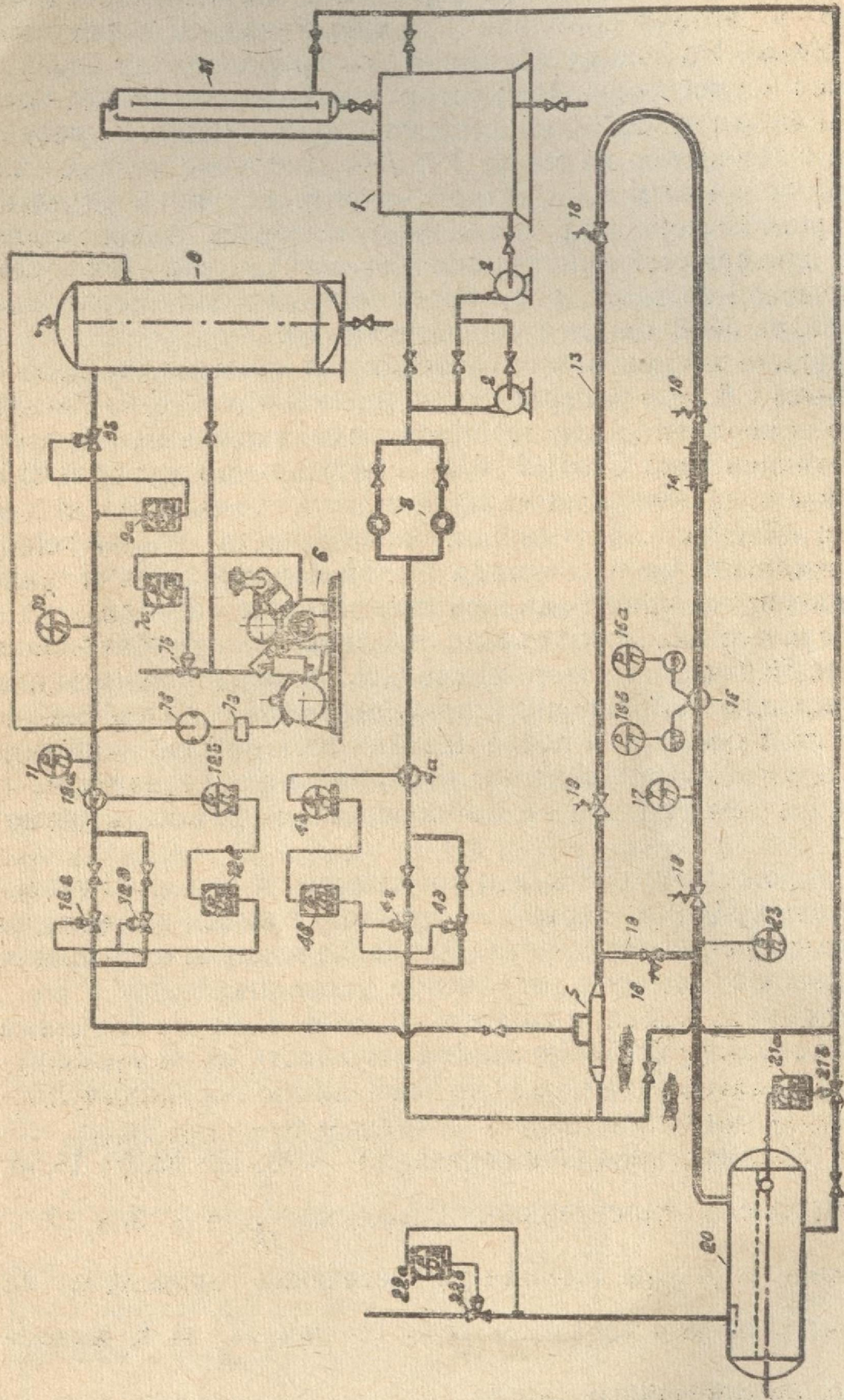


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
 1 — емкость, 2 — центробежный насос, 3 — счетчик СВШ 5.16/40, 4а—д — система замера и регулирования расхода  
 да жидкости, 5 — смеситель, 6 — компрессор, 7а—г — система автоматического включения компрессора, 8 — воз-  
 духосборник, 9а, б — регулятор давления, 10, 17 — термометры, 11, 16а, б, 23 — образцовые манометры, 12а—д —  
 система замера и регулирования расхода воздуха, 13 — стабилизирующий участок, 14 — прозрачная вставка,  
 15 — насадок, 18 — отсекающий клапан, 19 — перепуск, 20 — сепаратор, 21а, б — регулятор уровня, 22а, б —  
 регулятор давления, 24 — мерная емкость.

мостей между скоростью смеси  $w$  и газосодержанием  $\beta$  в условиях выходного сечения насадка  $F$  и отношением давлений  $\varepsilon = \frac{p_2}{p_1}$  (где  $p_1$  и  $p_2$  — соответственно давления до и после насадка).

Оценка погрешности измерений показала, что максимальная ошибка в определении скорости истечения смеси не более  $\pm 2\%$ , а в определении газосодержания — менее  $\pm 4\%$ .

Результаты тарировочных опытов по истечению воды дали хорошее совпадение с данными других авторов.

Третья глава посвящена изучению характерных особенностей процесса истечения газожидкостных смесей через цилиндрические насадки.

Визуальные наблюдения структуры потока показали, что при  $\varepsilon < 0,9$ , несмотря на многообразие структурных форм течения в трубе перед насадком, в выходном сечении его устанавливается весьма диспергированный поток, газосодержание которого мало меняется во времени. В насадке полное перемешивание жидкости и газа достигается на расстоянии  $(2-3)d$  от входной кромки, и далее поток движется как однородная сильно диспергированная газожидкостная смесь. В области  $\varepsilon > 0,9$  степень диспергированности в выходном сечении существенно уменьшается.

Термодинамический характер процесса расширения двухфазной смеси определяется из уравнения состояния, которое при условии отсутствия скольжения фаз и изэнтропичности истечения получено в виде:

$$p \left( v \frac{\beta}{x} \right)^m = \text{const}, \quad (1)$$

где показатель процесса

$$m = \frac{(1-x) C_{vж} + x C_{рг}}{(1-x) C_{vж} + x C_{vg}}. \quad (2)$$

Здесь

- $v$  — удельный объем смеси;
- $x$  — массовое газосодержание;
- $C_{vж}$  — удельная теплоемкость жидкости при постоянном объеме;
- $C_{рг}$  и  $C_{vg}$  — удельные теплоемкости газа соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме.

Расчеты, проведенные по формуле (2), показали, что для воздуховодяной смеси в широкой области изменения газосодержания ( $0 < \beta < 0,98$  при  $p = 0,14 \text{ Мн/м}^2$ ) можно принять  $m = 1$ . Для проверки этого вывода были проведены специальные опыты по измерению перепада температур между входным и выходным сечениями насадка, которые также показали, что даже при весьма малом содержании воды в воздуховодяном потоке процесс истечения можно считать изотермным.

На основании измерений статических давлений по длине цилиндрического насадка установлено, что при сверхкритическом перепаде давлений скачок изменения параметров потока на выходе из насадка отсутствует, в отличие от однофазного газового потока, при этом в насадке существует область, в которой критерий Маха равен единице. В докритическом режиме получены кривые распределения давления по длине насадка для различных газосодержаний при постоянном  $\varepsilon$ .

В четвертой главе приведены результаты исследований истечения при критических параметрах.

Аналогично однофазному газовому потоку скорость истечения двухфазной смеси ограничивается величиной скорости звука в смеси. В этой связи в работе получено уравнение скорости распространения звука в газожидкостной смеси с учетом теплообмена между фазами и в допущении гомогенности потока:

$$a = \sqrt{\frac{mp}{\rho\beta}}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность смеси.

Для определения критической скорости истечения использовалась следующая методика проведения опытов. Предварительно устанавливали такой режим истечения, при котором отношение статических давлений  $\frac{p_2}{p_1}$  было заведомо меньше критического. При этом расход жидкости поддерживался регулятором расхода, а на линии, подводящей воздух к смесителю, запорная арматура была полностью открыта, так что расход воздуха устанавливался максимально возможным при данном режиме истечения. Затем постепенно повышали давление после насадка, наблюдая за изменением расходов жидкости и воздуха и давления перед насадком. До тех пор, пока давление было меньше критического, давление перед насадком и расходы жидкости и газа оставались неизменными. Как только  $p_2$  ста-

новилось больше критического, отмечалось повышение давления перед насадком и падение расхода воздуха. Начало изменения расхода воздуха и давления перед насадком соответствует переходу из критической области истечения в докритическую. Отношение давлений  $\frac{p_2}{p_1}$ , соответствующее началу

этого перехода, является критическим отношением  $\epsilon_{кр}$ , при этом скорость смеси в выходном сечении насадка — критическая.

Исследованиями установлено, что с уменьшением газосодержания критическое отношение давлений снижается. Эта зависимость для  $p_{2кр} = 0,12 \div 0,16 \text{ Мн/м}^2$ ,  $\frac{l}{d} = 5$ ,

$\beta = 0,45 \div 1$  выражается следующей формулой:

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр. см.} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр. возд} - 0,372 (1 - \beta)^{0,486}, \quad (4)$$

где

$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр. возд}$  — критическое отношение давлений для  $\beta = 1$ , которое в наших условиях равно 0,498 (с учетом потерь).

Экспериментально было также установлено, что в интервале  $\beta = 1 \div 0,85$  происходит резкое падение критической скорости смеси, а при дальнейшем уменьшении газосодержания величина критической скорости снижается медленнее, достигая минимума примерно при  $\beta = 0,5$ .

Величина критической скорости истечения практически не зависит от физических свойств жидкого компонента. Относительная длина насадка также не оказывает влияния на  $w_{кр}$ . Последнее объясняется тем, что при критическом перепаде давлений критические условия устанавливаются в выходном сечении насадка.

Вязкость жидкости не оказывает заметного влияния и на критическое отношение статических давлений. Но увеличение плотности жидкого компонента и относительной длины насадка вызывает при постоянном газосодержании уменьшение  $\epsilon_{кр}$  вследствие роста потерь давления по длине насадка.

Опытные данные по критической скорости смеси при низком критическом давлении расположены несколько выше значений скорости звука, вычисленных по формуле (3). Объясняется это,

по-видимому, наличием относительного движения фаз в насадке.

При обработке опытных данных по истечению в критическом режиме было замечено, что отношение потенциальной энергии критического потока к его полной энергии сохраняет постоянное значение в области  $\beta = 0,45 - 0,98$ . Исходя из этого получена эмпирическая формула для определения критической скорости истечения:

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{2(1-C)}{C} \frac{\rho_{кр}}{\beta}}, \quad (5)$$

где  $C$  — отношение потенциальной энергии критического двухфазного потока к его полной энергии.

Величина  $C$  зависит от плотности жидкого компонента. Так, для керосина  $C = 0,34$ , для воды  $C = 0,3$  и для водоглицеринового раствора  $C = 0,258$ .

В пятой главе рассмотрены вопросы истечения газожидкостных смесей через цилиндрические насадки в докритическом режиме.

Методика проведения исследований по установлению зависимости скорости истечения от газосодержания и перепада давления заключалась в следующем. Установка переводилась полностью на автоматическое регулирование. При этом регуляторы расхода поддерживали строго заданные расходы жидкости и газа, а регулятор давления обеспечивал необходимое противодействие на исследуемой насадке. Опыты проводились при постоянном газосодержании смеси в области изменения  $\beta$  от 0 до 1 для двух фиксированных значений противодействия  $0,137 \text{ Мн/м}^2$  и  $0,294 \text{ Мн/м}^2$ . Для каждого газосодержания опыты проводились при различных расходах жидкости и газа, что определяло величину давления перед насадком.

Экспериментами установлено, что для каждого газосодержания имеется своя вполне определенная зависимость скорости истечения от перепада давлений, причем с увеличением  $\beta$  величина скорости растет, достигая при критическом отношении давлений величины критической скорости для данного газосодержания. С увеличением  $\beta$  от 0 до 1 при одном и том же  $\epsilon$  скорость истечения увеличивается, однако ее возрастание происходит не пропорционально возрастанию газосодержания. Так, при увеличении  $\beta$  от 0 до 0,6 скорость истечения увеличивается примерно в 2 раза, до 0,8 — примерно в 3 раза, а с

увеличением  $\beta$  до 0,95—почти в 7 раз. Такое явление вполне закономерно и объясняется тем, что с увеличением газосодержания плотность смеси падает, причем резкое падение плотности имеет место в интервале  $\beta = 0,8 \div 1$ .

В результате аналитических исследований получено уравнение для расхода газожидкостной смеси при истечении ее через насадку, которое имеет вид, аналогичный уравнению для расхода газа:

$$Q = \mu \varepsilon_p F \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (6)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;

$\varepsilon_p$  — коэффициент расширения, который для изотермного истечения смеси имеет вид:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4 \left[ (1 - \beta) + \beta \frac{p_2}{p_1} \right]^2} \left[ (1 - \beta) - \frac{\beta \frac{p_2}{p_1}}{1 - \frac{p_2}{p_1}} \ln \frac{p_2}{p_1} \right]} \quad (7)$$

где  $d$  — диаметр насадки;

$D$  — диаметр трубопровода.

Сравнение результатов экспериментальных исследований с формулой (6) показало, что коэффициент расхода  $\mu$  имеет различные значения не только для различных значений  $\beta$ , но и для разных  $\frac{p_2}{p_1}$ . В то же время, произведение коэффициентов расхода и расширения  $\mu' = \mu \varepsilon_p$  с точностью  $\pm 5\%$  не зависит от относительного давления. Тогда формула (6) принимает вид:

$$Q = \mu' F \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (8)$$

Таким образом, процесс истечения двухфазного потока в докритическом режиме с достаточной точностью подчиняется законам гидродинамики однофазной жидкости. Однако нахождение значений  $\mu'$  для различных случаев истечения смесей жидкости и газа требует чрезвычайно большой экспериментальной работы, во много раз превышающей исследования по

определению коэффициентов расхода при истечении однофазных жидкостей. Объясняется это тем, что  $\mu'$  зависит не только от физических свойств компонентов смеси и геометрических характеристик насадков, но и от газосодержания и абсолютного давления.

Задача значительно облегчается, если известны критические параметры потока —  $w_{кр}$  и  $\varepsilon_{кр}$  для данных условий истечения или для подобных условий, но при другом давлении. В процессе обработки опытных данных по истечению воздуховодяной смеси через цилиндрические насадки с  $\frac{l}{d}=5$  при противодавлении  $0,137 \text{ Мн/м}^2$  нами получена обобщенная зависимость безразмерной скорости истечения от безразмерного перепада давления, которая описывается уравнением:

$$\frac{w}{w_{кр}} = \sqrt{\frac{0,0326(1 - B)}{0,885B + 0,115} - 0,763 \lg(0,885B + 0,115)}, \quad (9)$$

где

$$B = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{кр}}{1 - \varepsilon_{кр}}.$$

Предложена формула для расчета скорости истечения смеси при любом давлении  $p'_2$ , если известны критические параметры при давлении  $p_2$ :

$$w_1 = w \left( \frac{p'_2}{p_2} \right)^{\frac{n}{2}}, \quad (10)$$

где  $w$  — скорость смеси при давлении  $p_2$  по формуле (9);  
 $n$  — показатель степени, зависящий от  $\beta$  и определяемый по эмпирической формуле

$$n = (1 - \beta^3)^{0,42} \quad (11)$$

Для проверки точности предложенного метода расчета было проведено около 300 опытов по истечению воздуховодяных смесей через насадки с  $\frac{l}{d} = 5$  при различных противодавлениях и газосодержаниях в интервалах их изменения  $p'_2 = 0,14 \div 0,48 \text{ Мн/м}^2$  и  $\beta = 0,45 \div 0,98$ . Эти эксперимен-

ты показали, что рекомендованный метод расчета скорости истечения смеси обеспечивает точность  $\pm 5\%$ .

Исследования показали, что увеличение плотности жидкого компонента вызывает уменьшение скорости истечения при одних и тех же значениях  $\beta$  и  $\frac{p_2}{p_1}$ . Вязкость жидкости в исследованном интервале ее изменения не оказала заметного влияния на скорость смеси вследствие больших значений  $Re_{см}$  (во всех опытах  $Re_{см}$  был более 3000). Увеличение  $\frac{l}{d}$  при постоянных  $\beta$  и  $\frac{p_2}{p_1}$  также приводит к уменьшению скорости истечения.

В то же время все опытные данные по истечению смесей воздух — водоглицериновый раствор, воздух — керосин, а также данные по истечению воздуховодяных смесей через длинный насадок ( $\frac{l}{d} = 12$ ), как и результаты опытов по истечению воздуховодяной смеси через насадки с  $\frac{l}{d} = 5$ , легли на кривую обобщенной зависимости (9).

В шестой главе изложены результаты промысловых исследований по истечению газонефтяных смесей через устьевые штуцера фонтанирующих скважин.

Экспериментальные исследования по определению критической скорости истечения газонефтяной смеси были проведены на скважине № 100 месторождения «Прорва» объединения «Казахстаннефть».

Для исследования использовались стальные штуцера диаметром 4,26, 5,47 и 6,86 мм с  $\frac{l}{d} = 5$ .

Измерение основных параметров потока осуществлялось с помощью объемного и диафрагменного расходомеров, образцовых манометров и термометров. Погрешность в определении дебитов нефти и газа не превышала  $\pm 3\%$ .

Анализ результатов исследований показал, что при истечении двухфазных газожидкостных смесей через цилиндрические штуцера при высоких критических давлениях (по крайней мере выше  $5 \text{ Мн/м}^2$ ) практически отсутствует относительное движение фаз и критическая скорость истечения с достаточной точностью может быть определена по формуле (3).

Последнее дает возможность методом постепенного приближения рассчитать величину критического давления при истечении газонефтяной смеси в критическом режиме, если известны дебит нефти  $Q_n^0$ ; газовый фактор  $\Gamma$ , количество растворенного в нефти газа  $\Gamma_p$ , плотности нефти  $\rho_n^0$  и газа  $\rho_r^0$ , а также площадь сечения штуцера  $F$ . Расчетная формула имеет вид:

$$p_{кр} = \frac{Q_n^0}{F} \sqrt{(\Gamma - \Gamma_p)(\rho_n^0 + \rho_r^0 \Gamma) p_0 \frac{T}{T_0} z}, \quad (12)$$

где  $z$  — коэффициент сжимаемости.

В результате анализа данных, собранных нами на ряде месторождений «Хаян-Корт» и «Малгобек» объединения «Грознефть», установлено, что критическое отношение давлений уменьшается с уменьшением газосодержания, что вполне согласуется с результатами исследований, проведенных на лабораторной установке. Закономерность изменения  $\varepsilon_{кр}$  с увеличением критического давления качественно не меняется, а изменяется лишь ее количественное значение. Увеличение критического давления приводит к возрастанию  $\varepsilon_{кр}$ .

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. При истечении газожидкостных смесей через цилиндрические насадки с острой входной кромкой имеют место два режима истечения — критический и докритический. В критическом режиме истечения при изменении давления за насадком расход смеси остается постоянным, а в докритическом режиме изменение противодавления вызывает соответствующее изменение расхода смеси.

2. Поток в выходном сечении насадка в критическом и в широкой области докритического режима истечения весьма диспергирован, независимо от его структуры перед насадком.

3. В широкой области газосодержаний ( $\beta < 0,98$  при  $p = 0,14 \text{ Мн/м}^2$ ) процесс истечения можно считать изотермным.

4. При сверхкритическом перепаде давлений скачок изменения параметров потока на выходе из насадка отсутствует, в отличие от однофазного газового потока, при этом в насадке существует область, в которой критерий Маха равен единице.

5. Существенное влияние на величину критических параметров оказывает газосодержание смеси. Добавление в газовый поток небольшого количества жидкости приводит к резкому падению критической скорости смеси в интервале  $\beta = 1 \div 0,95$ , а при дальнейшем снижении газосодержания величина критической скорости снижается медленнее, достигая минимума, примерно при  $\beta = 0,5$ . Критическое отношение давлений с уменьшением газосодержания также снижается.

6. Получено аналитическое уравнение для определения скорости распространения звука в гомогенной газожидкостной смеси с учетом теплообмена между фазами.

7. При истечении двухфазной смеси через цилиндрические насадки при высоких критических давлениях практически отсутствует относительное движение компонентов, и в этих условиях величина критической скорости истечения совпадает со скоростью распространения звука в смеси, вычисленной из условия отсутствия скольжения фаз.

8. Впервые проведено систематическое исследование истечения газожидкостной смеси в докритическом режиме. Величина скорости истечения в докритическом режиме растет с увеличением перепада давления, достигая при критическом отношении давлений величины критической скорости. Для каждого газосодержания существует своя вполне определенная зависимость скорости истечения от перепада давления. С увеличением газосодержания при одном и том же  $\frac{p_2}{p_1}$ , скорость истечения растет.

9. Обработка опытных данных позволила установить обобщенную зависимость скорости истечения от перепада давления, на основании которой предложена методика расчета расхода смеси в докритическом режиме истечения.

10. Проведенные эксперименты позволили выявить влияние плотности и вязкости жидкого компонента и относительной длины цилиндрического насадка на критическую скорость истечения, на критическое отношение давлений и на скорость смеси в докритическом режиме истечения.

11. В результате исследований установлена возможность измерения расхода газожидкостных смесей с достаточной для практики точностью с помощью цилиндрических насадок.

**Основное содержание диссертации  
опубликовано в следующих статьях:**

1. Гужов А. И., Медведев В. Ф. Исследование истечения газожидкостной смеси через цилиндрические насадки при критических параметрах. Теплоэнергетика № 8, 1966.

2. Гужов А. И., Медведев В. Ф. Истечение газожидкостного потока через цилиндрические насадки. Нефтяное хозяйство, № 9, 1966.

3. Гужов А. И., Медведев В. Ф. Некоторые особенности истечения газожидкостной смеси через цилиндрические насадки. Теплоэнергетика, № 11, 1966.

4. Медведев В. Ф. Влияние физических свойств жидкости и относительной длины цилиндрического насадка на истечение двухфазной смеси.

Известия МВ и ССО СССР «Нефть и газ» № 11, 1966.

5. Гужов А. И., Медведев В. Ф. Определение расхода газожидкостной смеси. Известия МВ и ССО СССР «Нефть и газ» № 12, 1966.

Основные положения работы докладывались на Первой Всесоюзной межвузовской конференции по вопросам теории и практики разработки газоконденсатных месторождений в г. Баку, 1966 г.