

А. А. Пашали, В. Г. Михайлов, П. В. Петров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ЕСТЕСТВЕННОЙ СЕПАРАЦИИ

В представленной статье наглядно демонстрируется доказательство того, что концентрация пузырьков газа (или объемное содержание газа) также является фактором, существенно влияющим на процесс естественной сепарации газа, особенно при реверсивном течении жидкости. В статье описывается технология численного эксперимента, проведенного с использованием двухфазной математической модели пакета ANSYS CFX, для оценки влияния концентрации пузырьков газа в зоне сепарации на продольный градиент давления. Предлагаются зависимости, учитывающие влияние объемного содержания газа на величину градиента давления в зоне перфорации скважины и коэффициента гидродинамического сопротивления. В заключение статьи приводится анализ влияния эксплуатационных параметров скважины (дебита жидкой фазы, площади проходного сечения кольцевого канала, обводненности и газового фактора флюида) на величину коэффициента естественной сепарации. По результатам данного анализа было сделано заключение, что повышение обводненности флюида положительным образом способствует процессу естественной сепарации газа в реверсивном потоке жидкости. *Сепарация; погружной насос; скважина; пузырьки газа; численный эксперимент; математическая модель*

В настоящее время в связи с оптимизацией работы нефтяных скважин, погружного и наземного оборудования вопрос расчета сепарационных процессов у приема погружного оборудования приобретает особую актуальность. Несмотря на то, что известно значительное количество работ, посвященных естественной сепарации газа [1, 2], до последнего времени не имелось научно обоснованных и экспериментально проверенных зависимостей, позволяющих рассчитать коэффициент сепарации у приема погружного оборудования, расположенного ниже уровня перфорации скважины. Более того, факторы, определяющие сущность процесса естественной сепарации, понимаются разными авторами по-разному. Одни авторы считали, что процесс сепарации газа определяется геометрическими характеристиками приема и скважины (диаметр скважины), другие доказывали, что на процесс сепарации влияют не только геометрические характеристики, но и технологические параметры (дебит жидкости, приведенная скорость газовой фазы и т. д.) [4]. Авторами настоящей работы предпринималась попытка доказать, что концентрация пузырьков газа (или объемное содержание газа α_g) также является фактором, существенно влияющим на процесс естественной сепарации газа, особенно при реверсивном течении жидкости.

В ранних исследованиях авторами данной работы была предложена зависимость для определения коэффициента естественной сепарации

при реверсивном течении жидкости в зоне перфорации скважины в виде

$$E_s = \frac{V_s + C_0 \cdot V_{Sg2}}{C_0 \cdot (V_{SL} + V_{Sg2})}, \quad (1)$$

где

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{9}} \cdot \frac{r_d \cdot \left[(\rho_L - \rho_g) \cdot g - \frac{dP}{dz} \right]}{C_{d\infty}} \quad (2)$$

– скорость проскальзывания фаз; где dP / dz – градиент давления в зоне перфорации скважины, обеспечивающий реверсивный вид течения жидкости; $C_{d\infty}$ – коэффициент гидродинамического сопротивления всплывающего пузырька газа.

Из уравнения (1) следует, что коэффициент естественной сепарации скважины E_s зависит от величины скорости проскальзывания газообразной и жидкой фазы V_s , которая в свою очередь определяется величиной градиента давления в зоне сепарации dP / dz и коэффициента гидродинамического сопротивления $C_{d\infty}$. Экспериментальных или теоретических исследований, позволяющих оценить влияние объемного содержания газа α_g на величину dP / dz и $C_{d\infty}$, до настоящего времени не проводилось.

С целью восполнения имеющегося пробела знаний в этой области в настоящей работе предлагается численное исследование (численный эксперимент), проведенный с использованием двухфазной математической модели пакета ANSYS CFX, для оценки влияния концентрации пузырьков газа в зоне сепарации на продольный градиент давления dP / dz . И предлагаются за-

висимости, учитывающие влияние объемного содержания газа α_g на величину dP / dz и $C_{доо}$.

**1. ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ
В ОБЛАСТИ ПЕРФОРАЦИИ
СКВАЖИНЫ (ЧИСЛЕННЫЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ)**

Несколько общих слов о численном эксперименте. Что является численным экспериментом и какие задачи он решает? Точное численное моделирование – это не теория. Это даже не единственное теоретическое решение. В отличие от аналитической теории оно не дает уравнений, связывающих физические переменные друг с другом и с параметрами задачи. Напротив, любое численное моделирование является единичным численным экспериментом, выполняемым с определенным набором геометрических, физических, начальных и граничных условий. Численное моделирование может выявить нечто новое и неожиданное, когда модель достаточно сложна, и почти так же, как лабораторный эксперимент позволяет открыть что-то неизвестное в окружающем нас мире. Наиболее привлекательной чертой численного моделирования является то, что для того чтобы делать открытия, не требуется теоретической проницательности, а достаточно практической интуиции.

Численный и физический эксперимент содержит сходные типы погрешностей. Погрешности тарировки в эксперименте подобны неточностям вводимых констант или механистическим моделям в точном численном моделировании. При проведении численного эксперимента не возникают проблемы с замерами параметров. В качестве инструмента для численного эксперимента в данной работе был выбран пакет ANSYS CFX, способный осуществлять численное моделирование многофазных течений.

На рис. 1, 2 показан пример численного моделирования картины течения жидкости в кольцевом перфорированном канале и вид расчетной сетки, используемый авторами для численного расчета в пакете ANSYS CFX.

Для определения возможностей численного моделирования рассмотрим плюсы и минусы математической модели двухфазного течения, используемой в пакете ANSYS CFX.

Уравнения неразрывности для двухфазного дисперсного течения имеют вид (3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(H_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla(H_{\alpha} \rho_{\alpha} \bar{V}_{\alpha}) = \Gamma_{\alpha} + S_{\alpha}, \quad (3)$$

где \tilde{A}_{α} – массовый прирост фазы α за время t за счет агрегатного изменения жидкости β ; S_{α} – массовый прирост фазы α за время t за счет подвода массы извне; H_{α} – истинное объемное содержание жидкости, находящейся в фазовом состоянии α ; ρ_{α} – плотность фазы α ; $\bar{V}_{\alpha} = V(x, y, z)$ – вектор скорости фазы α .

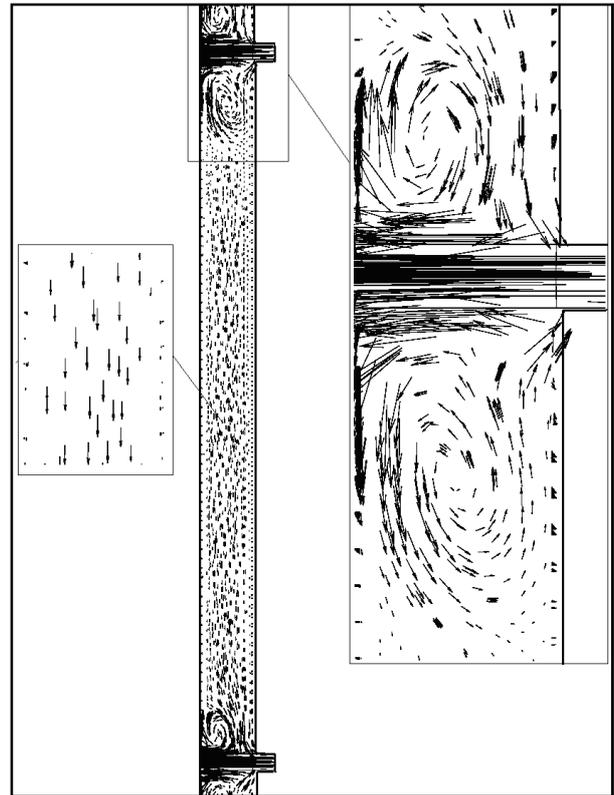


Рис. 1. Пример численного моделирования течения жидкости в кольцевом перфорированном канале

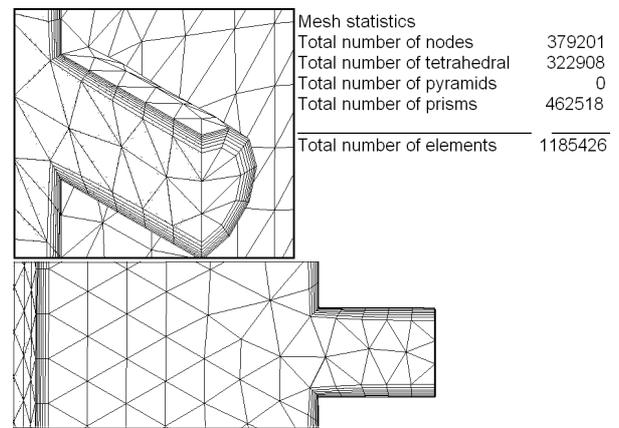


Рис. 2. Вид расчетной сетки

Процесс переноса массы через границу фаз выражается как произведение массовой скорости фазы на площадь их раздела:

$$\Gamma_{\alpha\beta} = m_{\alpha\beta} \cdot A_{\alpha\beta}; \Gamma_{\beta\alpha} = m_{\beta\alpha} \cdot A_{\beta\alpha}, \quad (4)$$

$m_{\beta\alpha}$ – массовая скорость потока фазы α за единицу времени через поверхность, разделяющую фазу β и фазу α ; $A_{\alpha\beta}$ – площадь раздела фаз для выделенного расчетного объема.

Для определения площади, ограничивающей объем фазы β , вводится параметр, соответствующий среднему диаметру дисперсной частицы d_{β} . В результате площадь контакта фаз определяется как

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6 \cdot H_{\beta}}{d_{\beta}}, \quad (5)$$

где из соображений устранения инверсии потока вводятся ограничения на величину объемного содержания дисперсной фазы $H_{\beta} = 10^{-7} \dots 0,8$.

Уравнения сохранения количества движения для двухфазной дисперсной модели выглядят как

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} (H_{\alpha} \rho_{\alpha} \bar{V}) + \nabla (H_{\alpha} \rho_{\alpha} \bar{V} \times |\bar{V}|) = \\ - H_{\alpha} \nabla p_{\alpha} + \nabla (H_{\alpha} (\tau_{\alpha} + (\tau_{\alpha})^T)) - \\ - \Gamma_{\alpha\beta} \bar{V} + M_{\alpha\beta} + S_{M\alpha} \\ \frac{\partial}{\partial t} (H_{\beta} \rho_{\beta} \bar{V}) + \nabla (H_{\beta} \rho_{\beta} \bar{V} \times |\bar{V}|) = \\ - H_{\beta} \nabla p_{\beta} + \nabla (H_{\beta} (\tau_{\beta} + (\tau_{\beta})^T)) - \\ - \Gamma_{\beta\alpha} \bar{V} + M_{\beta\alpha} + S_{M\beta} \end{array} \right], \quad (6)$$

где межфазовый момент передачи движения $M_{\alpha\beta}$ возникает из-за наличия сил приложенных к границе фазы α , в результате контакта ее с фазой β .

Межфазовый момент передачи движения, приложенный к границе раздела двух фаз, складывается из моментов, возникающих в результате наличия на границе фаз отдельных независимых физических эффектов, таких как

$$M_{\alpha\beta} = M_{\alpha\beta}^D + M_{\alpha\beta}^L + M_{\alpha\beta}^{LUB} + \\ + M_{\alpha\beta}^{VM} + M_{\alpha\beta}^{TD} + M_s + \dots, \quad (7)$$

где $M_{\alpha\beta}^D$ – момент от сил гидродинамического сопротивления; $M_{\alpha\beta}^L$ – момент от выталкивающих сил; $M_{\alpha\beta}^{LUB}$ – момент от вязких пристеночных сил; $M_{\alpha\beta}^{VM}$ – момент от виртуальной массовой силы; $M_{\alpha\beta}^{TD}$ – момент от турбулентного вихреобразования; M_s – момент от сил перепада давления в жидкости (только для твердых частиц); $S_{M\alpha}$ – момент от внешних массовых сил, приложенных к фазе α .

Для замыкания уравнений неразрывности и количества движения используется модель турбулентной вязкости типа $k - \varepsilon$.

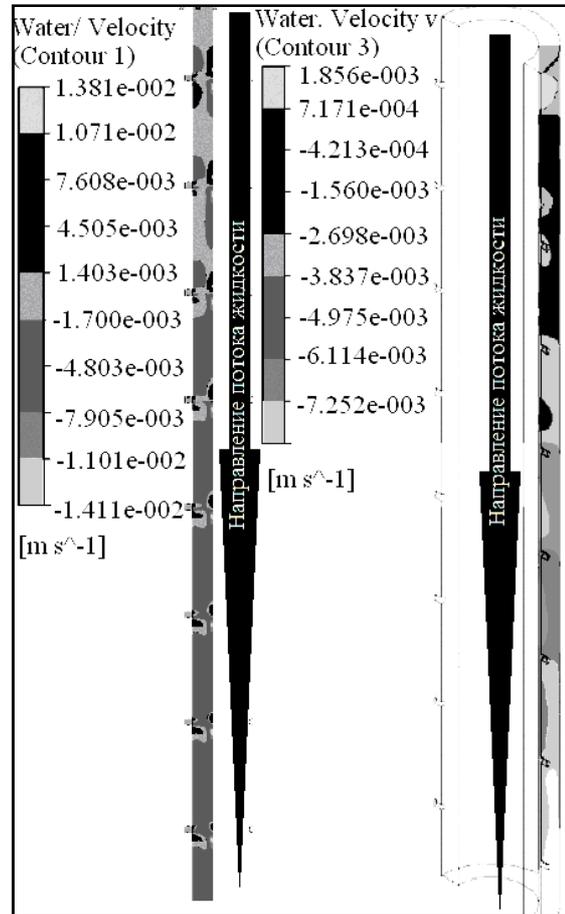


Рис. 3. Численный расчет безнапорного продольного поля скоростей жидкости в двух плоскостях кольцевого канала при $\alpha_g = 0$

Анализируя математическую модель двухфазного течения, заложенную в пакете ANSYS CFX, можно отметить, что применение уравнения (3), с одной стороны, повышает универсальность двухфазной модели, а с другой – из-за использования в расчетах дисперсной фазы постоянного диаметра не позволяет воссоздать физическую картину эволюции, которую претерпевает пузырек газа при прохождении области перфорации скважины.

Поэтому результаты численного эксперимента не представляется возможным использовать для получения поправочных (тарировочных) коэффициентов в математической модели для расчета коэффициента естественной сепарации. Математическая модель двухфазного течения пакета ANSYS CFX может быть использована только для качественного анализа картины течения газожидкостной смеси в области перфорации скважины.

На рис. 3 и 4 показаны поля скоростей жидкости в двух сечениях, по отверстиям и между отверстиями при отсутствии и наличии газа.

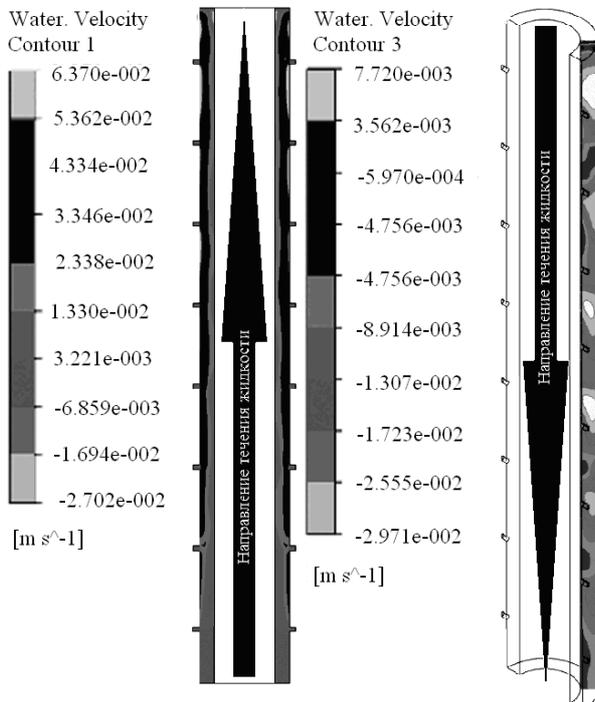


Рис. 4. Численный расчет безнапорного продольного поля скоростей жидкости в двух плоскостях кольцевого канала при $\alpha_g = 1,5 \times 10^{-3}$

Численное моделирование показало, что при попадании газа через перфорационные отверстия в реверсивно направленный поток жидкости всплывающие пузырьки газа концентрировались в плоскости расположения отверстий. В плоскости между отверстиями перфорации величина объемного содержания газа α_g была примерно на порядок меньше. Результатом такого неравномерного распределения пузырьков газа по периметру кольцевого канала явилась существенная асимметрия продольных профилей скоростей жидкости в канале.

На рис. 5 и 6 показаны расчетные продольные скорости жидкости в сечении отверстий и между ними, полученные при разных объемных содержаниях газа α_g . Из приведенных графиков видно, что всплывающие пузырьки газа в плоскости их наибольшей концентрации тормозят встречно движущиеся частицы жидкости и увлекают их с собой к верхнему сечению перфорационной зоны. Чем больше концентрация пузырьков газа в плоскости отверстий, тем большая кинетическая энергия передается от газа жидкости (см. рис. 5).

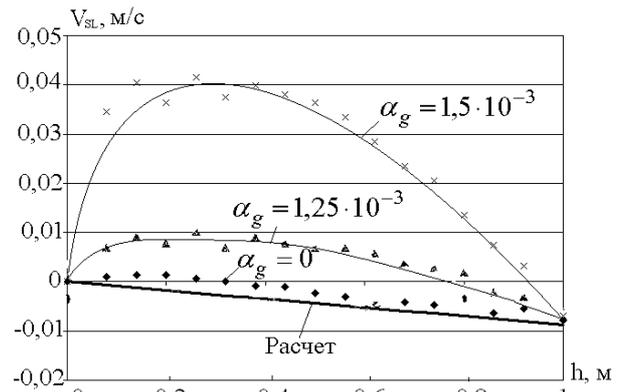


Рис. 5. Численный расчет продольного профиля скоростей жидкости в плоскости отверстий кольцевого канала

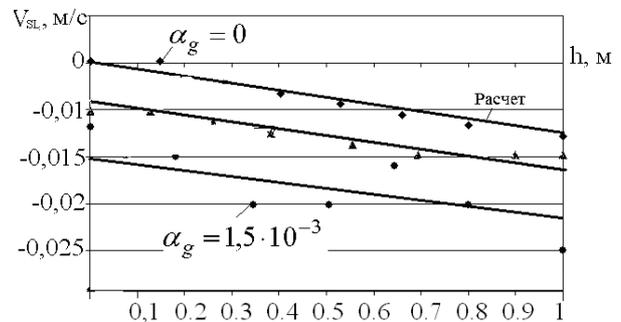


Рис. 6. Численный расчет продольного профиля скоростей жидкости в плоскости между отверстиями кольцевого канала

При достижении жидкостью, движущейся в одном направлении с пузырьками газа, верхнего сечения перфорации, поток жидкости разворачивается и движется вниз, повышая скорость реверсивного потока жидкости. На рис. 7 показана качественная картина течения жидкости в зоне перфорации при реверсивном течении жидкости, которая использовалась в расчетной модели для определения коэффициента естественной сепарации по уравнению (1).

На рис. 8 показана качественная картина течения жидкости в зоне перфорации, полученная по результатам численного эксперимента.

Анализ результатов численного эксперимента позволяет сделать заключение, что при расчете коэффициента естественной сепарации в условиях повышенного газосодержания в реверсивно движущемся потоке жидкости необходимо учитывать фактор дросселирующего воздействия пузырьков газа на поток жидкости.

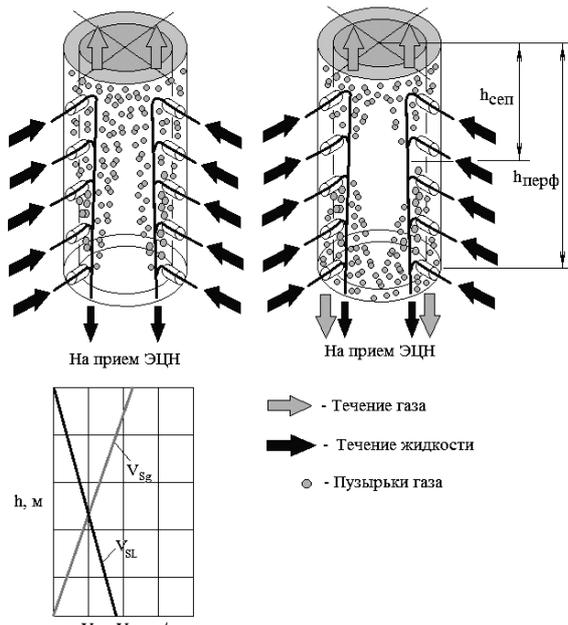


Рис. 7. Качественные картины движения жидкости и пузырьков газа в области перфорации

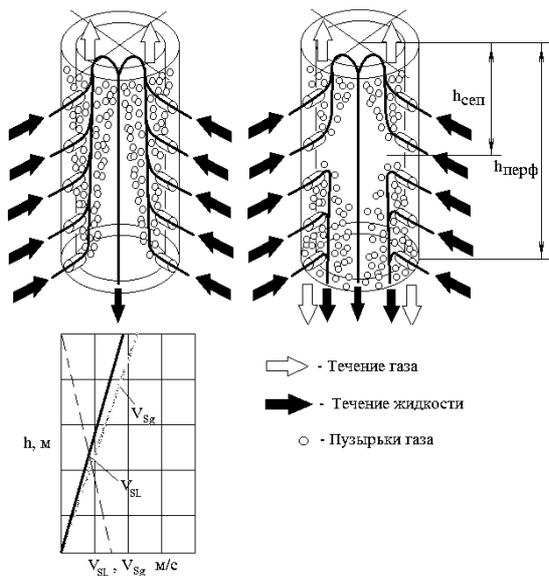


Рис. 8. Качественные картины движения жидкости и пузырьков газа в области перфорации

2. МОДИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ЕСТЕСТВЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ГАЗА В РЕВЕРСИВНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

С учетом заключения, сделанного по результатам численного эксперимента, была проведена модификация модели для расчета коэффициента естественной сепарации, которая заключалась в том, что при расчете скорости про-

скальзывания фаз V_s использовались новые механистические корреляции, учитывающие влияние на величины dP/dz и $C_{d\infty}$ истинного объемного содержания газа α_g .

В процессе разработки механистической корреляции автор, опираясь на свою способность научного предвидения, из большой системы физических эффектов, которые имеют место в рассматриваемом физическом явлении, выбирает (с его точки зрения) наиболее весомые и, математически описывая их, создает математическую модель. Феноменологическая модель для расчета коэффициента естественной сепарации по уравнению (1), была разработана на основе математического описания величины гидродинамического сопротивления единичного пузырька газа в реверсивном потоке жидкости в виде $C_{d\infty} = f(Re)$. На рис. 9 показана графическая интерпретация корреляций типа $C_{d\infty} = f(Re)$ некоторых авторов в работе [1].

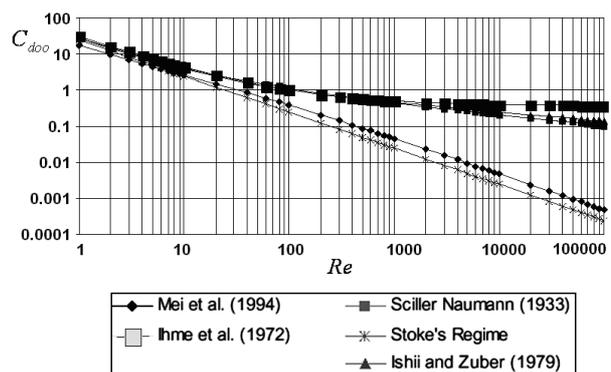


Рис. 9. Расчет гидродинамического сопротивления $C_{d\infty}$ единичного пузырька газа в безграничном потоке жидкости по различным корреляциям

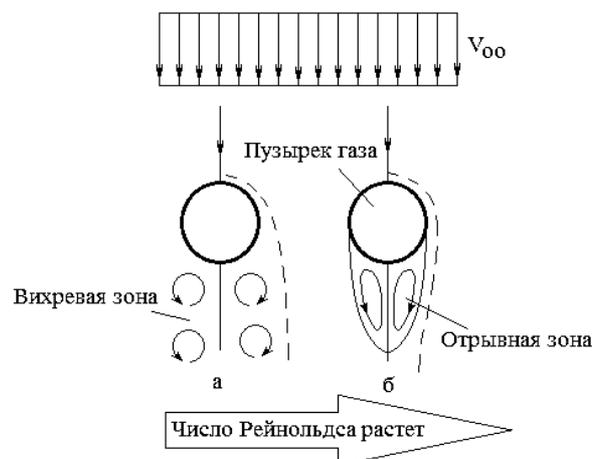


Рис. 10. Расчетные схемы вихревых течений в кормовой части пузырька газа

Результаты экспериментальных исследований [3], приведенные на рис. 12, показали, что при плотной упаковке всплывающих пузырьков газа (при относительном расстоянии между соседними пузырьками газа $D / (2r_d) < 1,4$ в уравнении для расчета коэффициента гидродинамического сопротивления необходимо учитывать влияние соседних пузырьков, т. е. в этом случае зависимость должна иметь вид $C_{d\infty} = f(\text{Re}, D / (2r_d))$. Получить такую зависимость можно, используя расчетную схему, предложенную на рис. 11. При выводе зависимости использовались следующие допущения: 1) пузырек газа заменялся шаром с радиусом r_d ; 2) пузырьки газа имели регулярное уплотнение; 3) шар с радиусом r_d обтекался струей несжимаемой жидкости диаметра D со скоростью $V_0 = V_s$; 4) рассматривалось неизотермическое течение, когда температура набегающей струи T_0 и поверхности шара T_w различны.

Алгоритм, который использовался для вывода зависимости $C_{d\infty} = f(\text{Re}, D / (2r_d))$ для пузырьков газа, был аналогичен алгоритму определения коэффициента гидродинамического сопротивления песчинок пласта, обтекаемых струей жидкости [3].

При заданных значениях D , r_d и V_0 требовалось определить диаметр и скорость сходящейся струи D_1, V_1 , а затем, используя теорему импульсов, вычислить силу, действующую на шар. Для решения данной задачи выберем систему координат (x, y) , как показано на рис. 11.

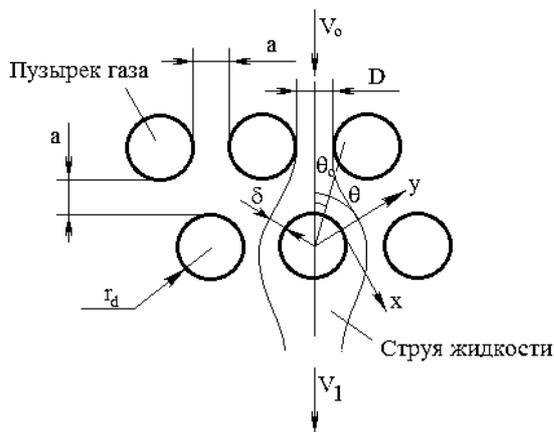


Рис. 11. Расчетная схема для получения зависимости $C_{d\infty} = f(\text{Re}, D / (2r_d))$

Рассмотрим осесимметричный струйный слой конечной толщины $\delta = \delta(x)$. В предположении изобаричности течения запишем основные уравнения сохранения в приближении пограничного слоя.

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho V \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y}; \\ u \frac{\partial \rho}{\partial x} + V \frac{\partial \rho}{\partial y} &= 0; \\ c_p \left(\rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho V \frac{\partial T}{\partial y} \right) &= \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y}; \\ \rho T &= \rho_0 T_0, \end{aligned} \tag{8}$$

где u и V – продольная и поперечная компоненты вектора скорости в слое.

Граничные условия

$$\begin{aligned} u = V = 0; T = T_w \text{ при } y = 0; \\ \partial u / \partial y = \partial T / \partial y = 0 \text{ при } y = \delta. \end{aligned} \tag{9}$$

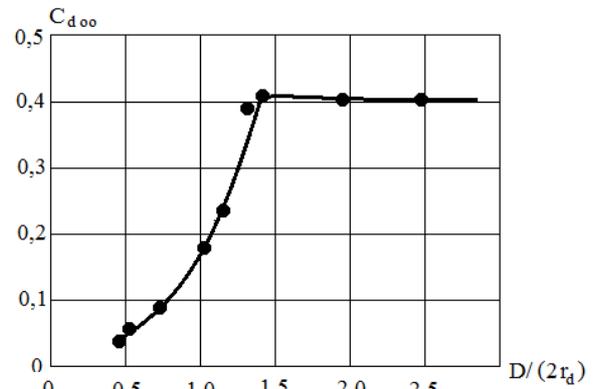


Рис. 12. Экспериментальная зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления $C_{d\infty}$ от относительного расстояния $D / (2r_d)$

Решение уравнений (8) при условии (9) позволило получить зависимость $C_{d\infty} = f(\text{Re}, D / (2r_d))$ в виде

$$\begin{aligned} C_{d\infty} &= 2 \left(\frac{D_0}{2r_d} \right)^2 \times \\ &\times \left[1 - \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \frac{875}{68 \cdot \text{Re}} \cdot \left(\frac{2r_d}{D_0} \right)^5 \right)^{\frac{2}{3}} \right]. \end{aligned} \tag{10}$$

Графический вид зависимости (10) при различных числах Рейнольдса показан на рис. 13, 14. Как видно, при достаточно малых значениях $D / (2r_d)$ эта зависимость близка к асимптотической $C_{d\infty} = 2(D / (2r_d))^2$, что соответствует опытным данным [3]. Однако данная зависимость справедлива только для ламинарного течения.

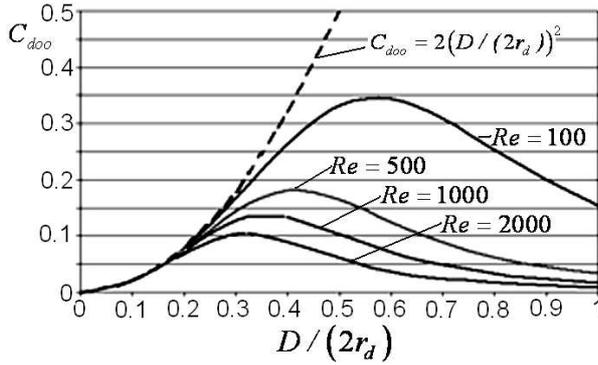


Рис. 13. Расчетная зависимость C_{doo} от $D/(2r_d)$ для ламинарного режима обтекания пузырька газа струей жидкости

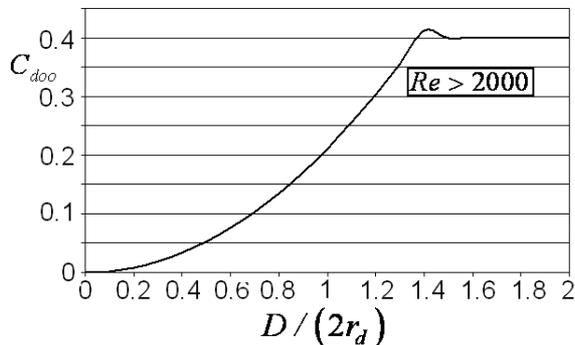


Рис. 14. Расчетная зависимость C_{doo} от $D/(2r_d)$ для турбулентного режима обтекания пузырька газа струей жидкости

Для оценки величины $D_1/(2r_d)$ для турбулентного режима течения воспользуемся экспериментальными данными, приведенными на рис. 12. Тогда уравнение для определения коэффициента гидродинамического сопротивления при $T_1 = T_0$ и $Re_\infty = 2r_d \sqrt{V_s} \rho_L / \mu_L > 2000$ будет иметь вид

$$C_{doo} = 0,2104 \left(\frac{D_0}{2r_d} \right)^2 \text{ при } \frac{D_0}{2r_d} < 1,4, \quad (11)$$

$$\left[C_{doo} = \frac{24}{Re_\infty} + 5,48 Re_\infty^{-0,573} + 0,36 \right] \text{ при } \frac{D_0}{2r_d} \geq 1,4. \quad (12)$$

С учетом уравнений (9)–(12) выражение для скорости проскальзывания газа V_s для режима течения при $\frac{D_0}{2r_d} < 1,4$ или $\alpha_g > 0,038$ будет иметь вид:

– для ламинарного режима течения $Re_\infty \leq 2000$, при $\frac{D_0}{2r_d} < 1,4$,

$$V_s = \sqrt{\frac{r_d (\rho_L - \rho_g) g - dP/dz}{9\rho_L (D_0/2r_d)^2}} \times \sqrt{\frac{1}{\left[1 - \left(1 + \frac{875 \cdot \mu_L \cdot (2r_d/D_0)^5}{136r_d (V_s + V_{SL2} E_s) \rho_L} \right)^{-\frac{2}{3}} \right]}} \quad (13)$$

– для турбулентного режима течения $Re_\infty > 2000$, при $\frac{D_0}{2r_d} < 1,4$,

$$V_s = \sqrt{\frac{2 \cdot r_d (\rho_L - \rho_g) g - dP/dz}{9 \cdot 0,2104 (D_0/2r_d)^2}}, \quad (14)$$

где $Re_\infty = 2r_d \sqrt{V_s} \rho_L / \mu_L$ – число Рейнольдса набегающего на пузырек газа потока жидкости;

$V_L = V_g - V_s = V_{sg2} (1 - E_s) / \alpha_g - V_s$ – действительная скорость жидкости;

$dP/dz = N(dP/dz)_{mp}$ – продольный градиент давления жидкости с учетом сопротивления пузырьков газа;

$N = 3\alpha_g (d_{ЭК}^2 - d_{HKT}^2) / (16r_d^2)$ – количество пузырьков газа в расчетном сечении кольцевого канала;

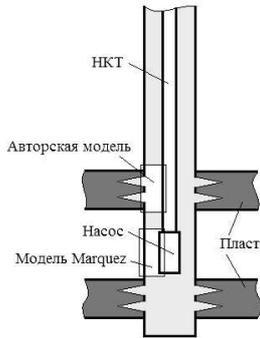
$(dP/dz)_{mp} = 0,5 f_{mp} \rho (V_{SL2} E_s - (1 - E_s) V_{sg2})^2 / d_{гид}$ – градиент давления от трения жидкости о стенки кольцевого канала.

В случае если относительное расстояние между пузырьками газа равно $D_0/2r_d > 1,4$, то для расчета скорости проскальзывания фаз можно воспользоваться уравнением (2), а диаметр пузырька газа рассчитать с использованием корреляции Marquez [1].

В заключение работы проведем сопоставление результатов расчета коэффициента естественной сепарации по следующим моделям (исходные данные и расчетные схемы показаны на рис. 15, 16):

- модели Marquez для расчета коэффициента сепарации на приеме электрического центробежного насоса (ЭЦН) выше уровня перфорации;
- новой модели для расчета коэффициента сепарации на приеме ЭЦН расположенного ниже уровня перфорации;

- новой модифицированной для высокого газосодержания модели для расчета коэффициента сепарации на приеме ЭЦН расположенного ниже уровня перфорации.



Исходные данные:

Газовый фактор, $\text{м}^3/\text{м}^3$	80
Дебит жидкости при стандартных условиях ($\text{м}^3/\text{сут}$)	200
Диаметр эксплуатационной колонны (м)	0,132
Наружный диаметр двигателя ЭЦН (м)	0,103
Температура на приеме в насос ($^{\circ}\text{C}$)	60
Давление на приеме в насос (МПа)	9,5
Удельный вес нефти по воде	0,86
Удельный вес газа по воздуху	0,8
Обводненность	0,1
Угол наклона скважины от горизонтали (градусы)	90
Высота щели приема ЭЦН (м)	0,0762
Высота перфорированного участка, м	10,15
Внешний диаметр НКТ, м	0,073

Рис. 15. Исходные данные для результата расчета коэффициента естественной сепарации

При одинаковых исходных данных эффективность естественной сепарации газа на приеме ЭЦН у конструктивной схемы с расположением приема насоса ниже уровня перфорации на ~50% выше, чем у конструктивной схемы с приемом насоса, расположенным выше перфорации скважины (см. рис. 15, 16). Модификация новой модели сепарации газа для условий с повышенным газосодержанием смеси позволяет повысить точность расчета коэффициента естественной сепарации на 13–17% (см. рис. 15, 16).

Для качественного сопоставления результатов расчета E_s по численной и аналитической модели в механистической модели авторы работы были вынуждены ввести допущение о постоянстве радиуса пузырька газа, т. е. корреляция Marquez в виде $r_d = f(V_{Sg}, V_{\infty})$ была заменена на постоянное значение $r_d = 0,0003$ м.

Сопоставление полученных характеристик (см. рис. 17) показало, что расхождение полученных значений не превышает 5%, а следовательно, можно предположить, что точность разработанной аналитической модели для расчета коэффициента естественной сепарации E_s сопоставима с численным расчетом в пакете ANSYS CFX.

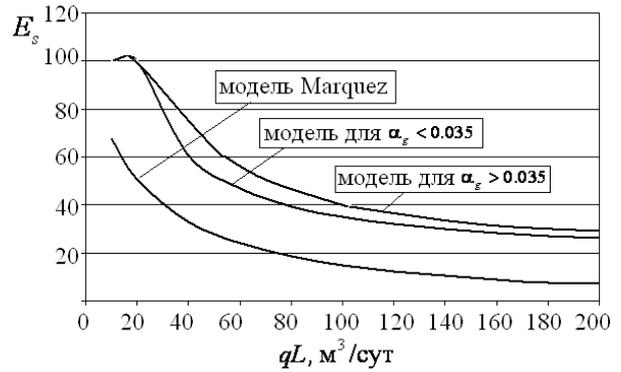


Рис. 16. Результаты расчета коэффициента естественной сепарации

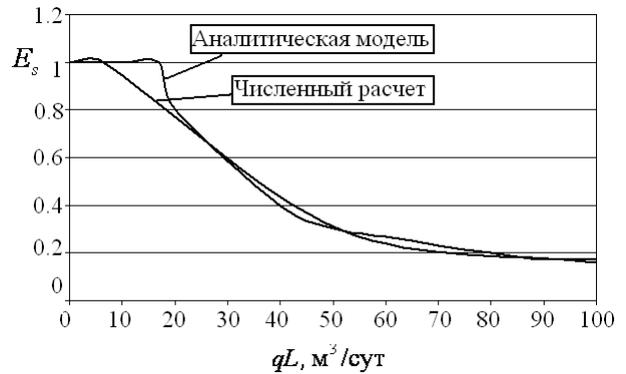


Рис. 17. Сравнение характеристик естественной сепарации

Чтобы продемонстрировать необходимость учета в модели эффекта, связанного с изменением размера пузырька газа, на рис. 18 были проведены расчеты характеристик естественной сепарации при постоянном значении $r_d = 0,0003$ м и при значении размера пузырька газа, рассчитанного по корреляции Marquez в виде $r_d = f(V_{Sg}, V_{\infty})$. Результаты расчетов показали необходимость учета в расчетной модели эффекта роста пузырьков газа при расчете величины E_s , так как расхождение расчетных характеристик при $r_d = 0,0003$ м и $r_d = f(V_{Sg}, V_{\infty})$ достигало до 65%.

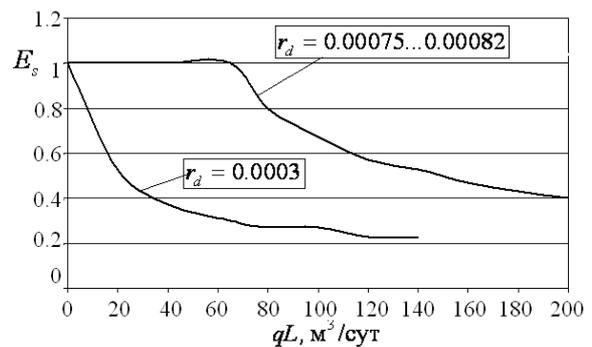


Рис. 18. Сравнение характеристик естественной сепарации

ВЫВОДЫ

В заключение статьи расчетным путем был проведен анализ влияния эксплуатационных параметров скважины (дебита жидкой фазы, площади проходного сечения кольцевого канала, обводненности и газового фактора флюида) на величину коэффициента естественной сепарации. На рис. 19 показана зависимость коэффициента естественной сепарации от дебита скважины при осуществлении процесса сепарации в кольцевых каналах с различным соотношением диаметров эксплуатационной колонны и НКТ. Немонотонный (ступенчатый) характер расчетных кривых объясняется изменением режима течения от пузырькового к пробковому. Интенсивное падение характеристики E_s до нуля с ростом жидкостного дебита скважины возникало в результате интенсивного роста градиента давления в зоне перфорации dP / dz (см. уравнение (2)) за счет дросселирования реверсивного потока жидкости пузырьками газа.

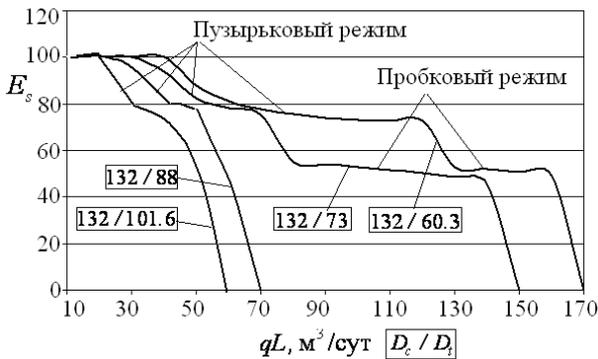


Рис. 19. Зависимость коэффициента естественной сепарации E_s от дебита скважины при различных значениях D_c / D_t ($GOR = 100, n = 0,1$)

На рис. 20 расчетным путем проведен анализ влияния величины газового фактора на коэффициент естественной сепарации при реверсивном течении жидкости. При больших проходных сечениях кольцевого канала $D_c / D_t = 132/60,3$ и $132/73$ увеличение газосодержания флюида не оказывало существенного влияния на процесс сепарации газа.

В каналах с меньшим проходным сечением $D_c / D_t = 132/88$ и $132/101,6$ за счет роста градиента давления dP / dz скорость проскальзывания фаз (см. уравнение (2)) становилась отрицательной и процесс естественной сепарации прекращался.

Анализируя вид расчетных зависимостей, показанных на рис. 21–22, можно сделать заключение, что повышение обводненности флюида положительным образом способствует

процессу естественной сепарации газа в реверсивном потоке жидкости.

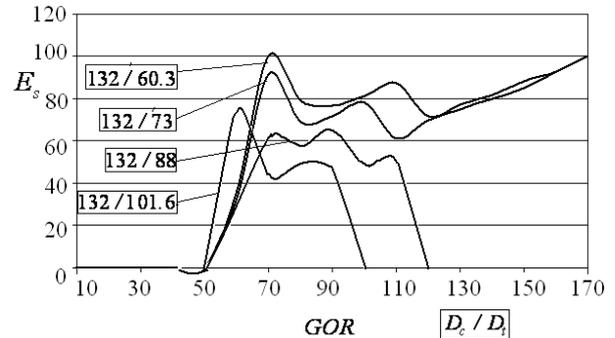


Рис. 20. Зависимость коэффициента естественной сепарации E_s от газового фактора GOR при различных значениях D_c / D_t ($Q_L = 60, n = 0,1$)

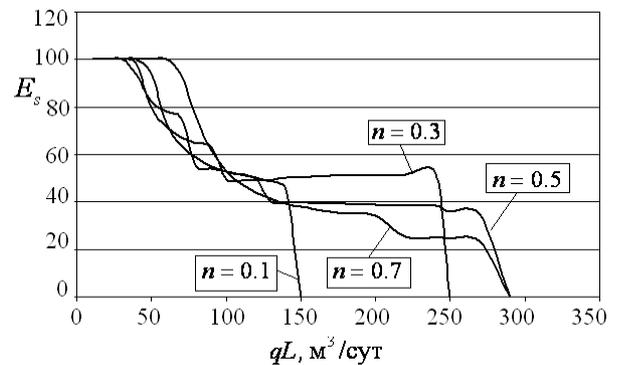


Рис. 21. Зависимость коэффициента естественной сепарации E_s от дебита флюида при различных значениях n ($Q_L = 60, D_c / D_t = 132/73$)

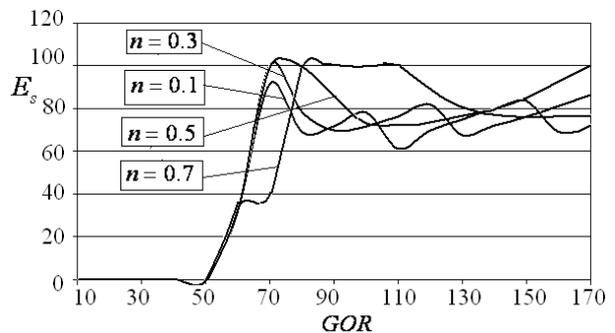


Рис. 22. Зависимость коэффициента естественной сепарации E_s от газосодержания флюида при различных значениях n ($Q_L = 60, D_c / D_t = 132/73$)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Marquez R.** Modeling Downhole Natural Separation: PhD dissertation. The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, 2004.
2. **Harmathy T. Z.** Velocity of Large Drops and Bubbles in Media of Infinite or Restricted Extent // AIChE J. (1960) 6, 281.
3. **Гольдштик М. А.** Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: АН СССР, 1984. 163 с.
4. **Мищенко И. Т.** Скважинная добыча нефти: Учеб. пособие для вузов. М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. 816 с.

ОБ АВТОРАХ

Пашали Александр Андреевич, зам. нач. упр. новых технологий КНТЦ ОАО «НК «Роснефть». Дипл. инж. по моделир. (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. многофазн. потока, комп. методов мониторинга и моделир-я процессов добычи нефти.

Михайлов Валерий Германович, проф. каф. нов. констр. механизмов и машин. Дипл. инж.-мех по гидравлич. машинам (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. газовой динамики двигателей.

Петров Павел Валерьевич, ст. преп. каф. приклад. гидромех. Дипл. маг. по техн. и технол. (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по гидравл. маш. и гидропневмоагрегаты (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем автоматизации летательных аппаратов.