

К ТЕОРИИ ГАЗЛИФТА

В. А. ШВАБ

Добыча нефти при помощи газлифта является по существу важнейшим способом эксплуатации глубоких и многодебетных скважин. Кроме того, принцип действия газлифта является основой двух способов эксплуатации скважины—фонтанного и компрессорного. Широкое распространение этих способов в нефтедобывающих районах является причиной того, что проблема работы газлифта стала проблемой большого практического значения.

Область применения газлифта не ограничивается нефтедобывающей промышленностью и имеет немалое значение для подъема воды с помощью компрессорных скважин при глубоком залегании водоносных горизонтов. Этот прием подъема воды с большой глубины получил достаточно широкое распространение. Так, например, можно указать несколько водоподъемных компрессорных станций, обеспечивающих водоснабжение на железных дорогах СССР.

Газлифт впервые был изобретен русскими инженерами Шуховым и Бари. Об изобретении этого способа Д. И. Менделеев писал еще в 1886 г. Широкое применение газлифта в нефтяной промышленности осуществилось в Бакинском районе в 1897 г. Несмотря на длительную историю газлифта и большое практическое значение его в нефтяной промышленности, несмотря на большие работы, проведенные с целью экспериментального и теоретического изучения проблемы газлифта, до сего времени, с теоретической точки зрения, проблема газлифта остается далеко не разрешенной.

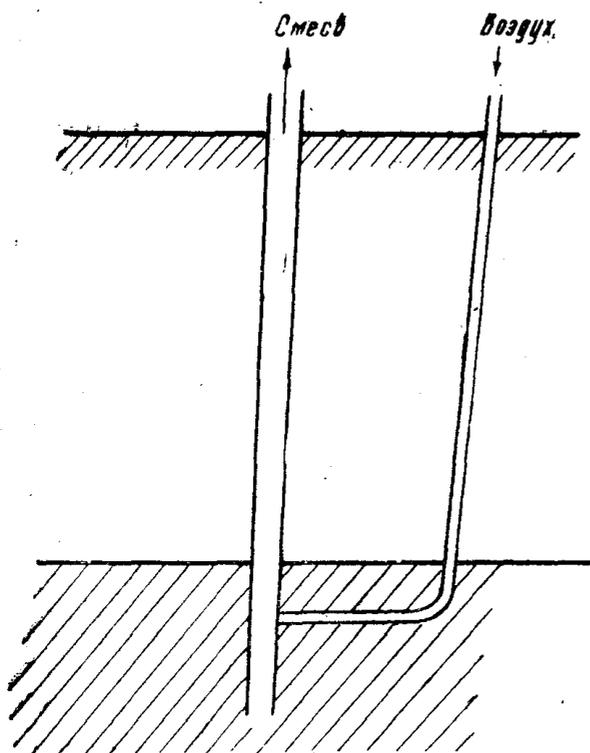
В отечественной литературе работа газлифта рассматривается Меликовым, Шищенко и Баклаковым, бригадой АзНИИ, Крыловым и, наконец, особенно обстоятельно, проф. Богдасаровым [1]. Указанный ряд работ дает представление о развитии теории газлифта. Сущность действия газлифта постепенно выступает все более ясно. Постепенно устраняются ошибки в общих физических положениях действующего газлифта. Однако общей чертой всех выполненных теоретических работ является предположительный характер о законах движения двухфазной жидкости в газлифте. Отсутствие общих положений о движении смеси газа и жидкости, как основы при рассмотрении теории газлифта, приводило авторов работ к значительному разнобою, а иногда и прямо к ошибочному представлению об особенностях двухфазного потока. Весьма различные исходные позиции в этом вопросе, естественно, приводили к значительному разнобою и в результатах работы. Отсутствие удовлетворительного соответствия с экспериментальным исследованием газлифта вынуждало к коррективам теоретических расчетов. Ввиду ограниченности настоящей статьи нет возможности останавливаться на имеющихся в литературе теориях газлифта, и мы можем лишь сослаться на подробный обзор, сделанный в книге проф. Богдасарова.

Основной целью настоящей работы является построение теории газлифта с новых позиций. Этими позициями являются новые результаты теоретического исследования двухфазного потока, обоснованные много-

численными опытными данными, касающимися структуры потока, его гидравлического сопротивления, действующего напора и т. д.

Мы здесь не останавливаемся на общеизвестных физических основах работы газлифта (см. схему фиг. 1), но, по возможности, вскроем принципиальные особенности, связанные с движением двухфазного потока, на теоретических основах которого может быть построена и собственно теория газлифта.

Основываясь на экспериментальном исследовании структуры двухфазного потока в трубах, в случае вертикального расположения последних, установлено рядом авторов [2], [3], [4], что для установившегося течения характерным является так называемый „пузырчатый“ или „пробковый“ режим движения двухфазного потока. Этот режим характеризуется крупными пузырями, занимающими значительную часть сечения трубы. Однако всегда сохраняется слой жидкости между пузырем и стенкой трубы. Пузыри



Фиг. 1

чередуются с жидкостной пробкой. В своей работе Костерин С. И. [4] делает попытку систематизации структуры потока, из которой следует, что, начиная с самых малых скоростей смеси и до значений, имеющих практическое значение, имеет место „пробковый“ режим движения смеси, который имеет при этом ряд стадий: а) спокойное пробковое течение, б) пробковое течение с пенообразованием за пузырем, в) пробковое течение с пенообразованием по всей границе раздела. При относительно значительных скоростях движения возникает пробковое течение с пробками из газожидкостной эмульсии и, наконец, более или менее равномерное эмульсионное течение для относительно малых содержаний газообразной составляющей. Для большого объемного содержания газовой составляющей пробковое течение сохраняется при значительно больших скоростях,

и из данных С. И. Костерина не следует развитие этого потока в эмульсионный. При больших содержаниях газа, как это очевидно, характерен не эмульсионный поток, а ядерное течение газа, несущего мелкие капли жидкости, при сохранении движущейся жидкостной пленки на стенках трубы, имеющей поступательное движение вверх; однако при местных утолщениях этой пленки возможны срывы жидкости вниз, которая снова подхватывается газом и, как уже указывалось выше, транспортируется последним в виде мелких взвешенных в газовом потоке капель.

Для работы газлифта имеет основное значение „пузырчатая“ или иначе „пробковая“ структура потока. Эмульсионная структура потока, появляющаяся при относительно очень больших скоростях движения смеси, не возникает в газлифте, так как необходимые скорости практически недостижимы. В газлифтах с очень низко расположенным приведенным уровнем поднимаемой жидкости или по терминологии проф. Богдасарова у

газлифтов с „малым силовым эффектом“ возникает течение двухфазной жидкости, характеризующееся ядерным течением газа благодаря крайне большому объемному содержанию газа. В этом случае жидкая фаза перемещается в периферийном кольцевом слое, а также транспортируется в капельном состоянии газовым потоком.

В настоящей работе, на первом этапе, ограничиваемся анализом работы газлифта при пробковом режиме движения двухфазной жидкости.

В дальнейших исследованиях работы газлифта будем основываться на результатах работы по теории двухфазного потока, опубликованных автором в 1948 и 49 гг. [5], [6]. Пробковая структура потока характеризуется коэффициентом относительного объемного содержания газа ξ в пределах значений последнего от 0 до 0,95, где

$$\xi = \frac{u_1}{u_1 + u_2},$$

u_1 — приведенная скорость газа, равная объемному расходу газа, отнесенному к площади поперечного сечения трубы;

u_2 — приведенная скорость жидкости, равная объемному расходу жидкости, отнесенному к площади сечения трубы.

Сопротивление трения при движении двухфазного потока при этой структуре потока определяется зависимостью

$$dp_f = \left[1 - \left(1 - k^2 \varphi^2 M^2 \right) \frac{\xi}{k \varphi z} \right] \lambda \frac{\gamma_2 U_0^2}{2gd} dy. \quad (1)$$

Для газожидкостной смеси при давлениях до 50 *ата* предыдущая формула упрощается, будет

$$dp = (1 - \xi) \lambda \frac{\gamma_2 U_0^2}{2gd} dy. \quad (2)$$

Средний удельный вес газожидкостной смеси, имеющий место в условиях движения по трубе (с учетом относительного движения газа и жидкости), определяется соотношением

$$\gamma_{cp} = \gamma_2 \left[1 - \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right) \frac{\xi}{k \varphi} \right]. \quad (3)$$

В приведенных выше выражениях приняты следующие обозначения:

U_0 — средняя расходная скорость двухфазного потока, равная сумме $u_1 + u_2$;

γ_1 и γ_2 — удельный вес газа и жидкости;

k — отношение максимальной скорости профиля скоростей однофазного потока к средней скорости в сечении $\frac{U_m}{U_0}$;

z — квадрат отношения диаметра пузыря к диаметру трубы

$$z = 1 - \frac{k \varphi - 1}{m k \varphi},$$

где

$$k = \frac{U_m}{U_0} = 1 + 3,75 \sqrt{\frac{\lambda}{8}};$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{0,975 k - 1}{0,24} \frac{\gamma_1}{\gamma_2}};$$

$$m = 1 - \frac{0,855}{1 + 0,87 \sqrt{\frac{\gamma_2}{\gamma_1}}};$$

- M — функция, определяющая соотношение между скоростью движения пузыря и движения слоя жидкости между пузырем и стенкой;
 λ — коэффициент сопротивления трения в области квадратичного закона сопротивления, определяющийся для шероховатых труб по известным зависимостям;
 d — диаметр трубы;
 g — ускорение силы тяжести.

Формулы, определяющие сопротивление трения, апробировались на основании многочисленных опытных материалов. В работе [6] были апробированы формулы, определяющие падение давления за счет сопротивления трения, а так же значение среднего удельного веса смеси на основании ряда экспериментальных материалов.

Работа Арманд [2], недавно опубликованная и посвященная экспериментальному определению среднего удельного веса двухфазной смеси при движении по вертикальным трубам, прекрасно подтверждает ранее опубликованные теоретические выводы относительно среднего удельного веса (двухфазной смеси), формула (3).

Дифференциальное уравнение движения двухфазной жидкости в подъемной трубе газлифта будет

$$-dp_t = dp + dp_w + \gamma_{cp} \sin \alpha \cdot dy. \quad (4)$$

Здесь

- p — полное падение давления;
 p_f — падение давления за счет сопротивления трения;
 p_w — падение давления за счет ускорения потока;
 y — координатная совпадающая с направлением вертикали;
 α — угол между осью трубы газлифта и горизонтом при наклонном положении газлифта.

Интеграл уравнения (4) может быть получен без каких-либо существенных упрощений и это будет показано ниже. Стремясь, однако, к упрощению метода расчета газлифта, используем принимаемое обычно допущение о незначительности влияния падения давления за счет ускорения потока. Тогда

$$-dp = dp_f + \gamma_{cp} \sin \alpha \cdot dy. \quad (5)$$

Пользуясь значением dp и γ_{cp} по выражению (2) и (3), получим

$$-dp = (1-\xi) \lambda \frac{\gamma_2 U_0^2}{2gd} dy + \gamma_2 \left[1 - \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right) \frac{\xi}{k\varphi} \right] \sin \alpha \cdot dy. \quad (6)$$

Удельный вес газа γ_1 в любом сечении газлифта может быть определен из условия изотермического расширения

$$\gamma_1 = \gamma_{11} \frac{p}{p_{11}}, \quad (7)$$

где γ_{11} — удельный вес газа при барометрическом давлении, равном p_{11} . В случае отсутствия подпора на выходе из газлифта, давление p_{11} соответствует давлению в выходном сечении газлифта. Объемный расход газа

V_1 через любое сечение газлифта при изотермическом процессе расширения газа определяется условием

$$V_1 = V_{11} \frac{p_{11}}{p}, \quad (8)$$

где V_{11} — расход газа через выходное сечение.

Приведенная скорость газа, в результате деления (8) на площадь сечения трубы, будет

$$u_1 = u_{11} \frac{p_{11}}{p}, \quad (9)$$

где u_{11} — приведенная скорость в выходном сечении газлифта.

Коэффициент относительного объемного газосодержания

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{u_2}{u_{11}}} \quad (10)$$

на основании равенства (9) будет

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}}}. \quad (11)$$

Средняя расходная скорость двухфазной смеси равна сумме приведенной скорости газа и жидкости, т. е.

$$U_0 = u_1 + u_2$$

или

$$U_0 = \frac{u_{11} p_{11}}{p} \left(1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}} \right). \quad (12)$$

Уравнение (6) можно теперь представить так

$$\begin{aligned} -dp = & \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}}} \right) \left(1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}} \right)^2 \frac{u_{11}^2 p_{11}^2}{p^2} \frac{\lambda \gamma_2}{2gd} dy + \\ & + \gamma_2 \sin \alpha \left[1 - \left(1 - \frac{\gamma_{11} p}{\gamma_2 p_{11}} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}} \right) k_{\varphi}} \right] dy \end{aligned} \quad (13)$$

Разделив переменные после умножения на $\frac{p}{p_{11}} \left(1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}} \right)$,

получим

$$\begin{aligned} & - \frac{p}{p_{11}} \left(1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}} \right) d \left(\frac{p}{p_{11}} \right) = \\ & \frac{\frac{u_2}{u_{11}} \frac{\lambda u_2^2}{2gd} \left(1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}} \right)^2 + \frac{p}{p_{11}} \left(1 + \frac{u_2}{u_{11}} \frac{p}{p_{11}} \right) \sin \alpha - \left(1 - \frac{\gamma_{11} p}{\gamma_2 p_{11}} \right) \frac{p}{p_{11}} \frac{1}{k_{\varphi}} \sin \alpha}{p_{11}} dy. \end{aligned} \quad (14)$$

Полагая

$$\frac{p}{p_{11}} = q \text{ и } \frac{\lambda u_2^2}{g d} = n$$

и группируя по степеням q , получим¹⁾

$$\frac{q dq + \frac{u_2}{u_{11}} q^2 dq}{\left[\frac{u_2}{u_{11}} \left(\frac{n}{2} + \sin \alpha \right) + \frac{\gamma_{11}}{\gamma_2} \frac{1}{k \varphi} \sin \alpha \right] q^2 + \left[n + \left(1 - \frac{1}{k \varphi} \right) \sin \alpha \right] q + \frac{n u_{11}}{2 u_2}} = \frac{\gamma_2}{p_{11}} dy. \quad (15)$$

Интегрирование этого уравнения в левой части выполним в пределах от $q_2 = \frac{p_2}{p_{11}}$ до $q_1 = \frac{p_{10}}{p_{11}}$, изменив предварительно общий знак на обратный, а в правой части от $y=0$ до $y=H$, причем считаем p_{10} соответствующим давлением у башмака газлифта, p_2 — давлением у выходного сечения и значение H равным длине газлифта. Таким образом,

$$\int_{q_2}^{q_1} \frac{q dq + \frac{u_2}{u_{11}} q^2 dq}{Aq^2 + Bq + C} = \frac{\gamma_2 H}{p_{11}}, \quad (16)$$

где

$$A = \left(\frac{n}{2} + \sin \alpha \right) \frac{u_2}{u_{11}} + \frac{\gamma_{11}}{\gamma_2} \frac{1}{k \varphi} \sin \alpha,$$

$$B = n + \left(1 - \frac{1}{k \varphi} \right) \sin \alpha,$$

$$C = \frac{n u_{11}}{2 u_2}.$$

Интегралом уравнения будет равенство

$$\frac{1}{A} \left\{ 1,15 \left(1 - \frac{u_2}{u_{11}} R \right) \log \frac{t_1^2 + a^2}{t_2^2 + a^2} - \frac{1}{a} \left[\frac{u_2}{u_{11}} S + \frac{R}{2} \left(1 - \frac{u_2}{u_{11}} R \right) \right] \left(\operatorname{arctg} \frac{t_1}{a} - \operatorname{arctg} \frac{t_2}{a} \right) + \frac{u_2}{u_{11}} (q_1 - q_2) \right\} = \frac{\gamma_2 H}{p_{11}} \quad (17)$$

или

$$\frac{1}{A} \left\{ 1,15 \left(1 - \frac{u_2}{u_{11}} R \right) \log \frac{t_1^2 - a^2}{t_2^2 - a^2} - \frac{1,15}{a} \left[\frac{u_2}{u_{11}} S + \frac{R}{2} \left(1 - \frac{u_2}{u_{11}} R \right) \right] \log \frac{(t_1 - a)(t_2 + a)}{(t_1 + a)(t_2 - a)} + \frac{u_2}{u_{11}} (q_1 - q_2) \right\} = \frac{\gamma_2 H}{p_{11}}. \quad (18)$$

¹⁾ Коэффициент φ представляет слабо зависящую функцию от $\frac{\gamma_1}{\gamma_2}$ и по абсолютному значению близок к единице, определяется для средних условий в газлифте.

В этих выражениях

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{B}{A} & H & \text{— длина газлифта;} \\
 S &= \frac{C}{A} & q_1 &= \frac{p_{10}}{p_{11}}; \\
 a^2 &= S - \frac{R^2}{4} & q_2 &= \frac{p_2}{p_{11}}; \\
 t_1 &= q_1 + \frac{R}{2} & p_2 & \text{— давление при выходе} \\
 & & & \text{из газлифта, равное} \\
 t_2 &= q_2 + \frac{R}{2} & p_{11} & \text{— подпор, созданный при} \\
 & & & \text{выходе из газлифта.}
 \end{aligned}$$

При положительном значении коэффициента

$$a^2 = S - \frac{R^2}{4},$$

решение уравнения газлифта соответствует равенству (17) и при отрицательном значении этого коэффициента — равенству (18).

Уравнение (17) или (18) является уравнением газлифта, определяющим основные соотношения между характеризующими его параметрами для газосодержания в пределах коэффициента ξ от 0 до 0,95.

Рассмотрим теперь уравнение газлифта с учетом инерционных сил. Падение давления за счет ускорения потока, ограничиваясь приближенным выражением через средние скорости, будет

$$dp_w = \rho U_0 dU_0.$$

Из условия неразрывности движения следует

$$\rho U_0 = \text{const},$$

где

$$\text{const} = \frac{\gamma_2}{g} \left[u_2 + \frac{\gamma_{11}}{\gamma_2} \frac{u_{11}}{k \varphi} \right].$$

Основное уравнение газлифта (4) в этом случае будет

$$-dp = dp_f + \text{const} dU_0 + \gamma_{cp} \sin \alpha dy. \quad (19)$$

После преобразований, аналогичных предыдущему случаю, получим

$$\frac{q dq + \frac{u_2 dq}{u_{11}} - \frac{\text{const} \cdot u_{11}}{p_{11}} \cdot \frac{dq}{q} - \frac{\text{const} \cdot u_2}{p_{11}} dq}{Aq^2 + Bq + C} = \frac{\gamma_2}{p_{11}} dy.$$

Интеграл этого уравнения при положительном значении a^2 будет

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{A} \left\{ 1,15 \left(1 - \frac{u_2 R}{u_{11}} \right) \log \frac{t_1^2 + a^2}{t_2^2 + a^2} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{a} \left[\frac{u_2}{u_{11}} S + \frac{R}{2} \left(1 - \frac{u_2 R}{u_{11}} \right) \right] \left(\text{arctg} \frac{t_1}{a} - \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \operatorname{arctg} \frac{t_2}{a} + \frac{u_2}{u_{11}} (q_1 - q_2) \left. \right\} + \frac{1}{A} \left\{ 1,15 D \log \frac{t_1^2 + a^2}{t_2^2 + a^2} + \right. \\
& \left. + \frac{1}{a} \left[\varepsilon + F - \frac{R}{2} D \right] \left(\operatorname{arctg} \frac{t_1}{a} - \operatorname{arctg} \frac{t_2}{a} \right) + 2,3 N \log \frac{q_1}{q_2} \right\} = \frac{\gamma_2 \cdot H}{p_{11}} \quad (20)
\end{aligned}$$

или при отрицательном значении a^2

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{A} \left\{ 1,15 \left(1 - \frac{u_2 R}{u_{11}} \right) \log \frac{t_1^2 - a^2}{t_2^2 - a^2} - \right. \\
& - \frac{1,15}{a} \left[\frac{u_2}{u_{11}} S + \frac{R}{2} \left(1 - \frac{u_2 R}{u_{11}} \right) \right] \log \frac{(t_1 - a)(t_2 + a)}{(t_1 + a)(t_2 - a)} + \\
& \left. + \frac{u_2}{u_{11}} (q_1 - q_2) \right\} + \frac{1}{A} \left\{ 1,15 D \log \frac{t_1^2 - a^2}{t_2^2 - a^2} + \right. \\
& \left. + \frac{1,15}{a} \left[\varepsilon + F - \frac{RD}{2} \right] \log \frac{(t_1 - a)(t_2 + a)}{(t_1 + a)(t_2 - a)} + \right. \\
& \left. + 2,3 N \log \frac{q_1}{q_2} \right\} = \frac{\gamma_2 H}{p_{11}}. \quad (21)
\end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
A &= \left(\frac{n}{2} + \sin \alpha \right) \frac{u_2}{u_{11}} + \frac{\gamma_{11}}{\gamma_2} \frac{1}{k\varphi} \sin \alpha; & q_1 &= \frac{p_{10}}{p_{11}}; \\
B &= n + \left(1 - \frac{1}{k\varphi} \right) \sin \alpha; & q_2 &= \frac{p_2}{p_{11}}; \\
C &= \frac{n u_{11}}{2 u_2}; & D &= - \frac{\operatorname{const} \cdot u_{11}}{S \cdot p_{11}}; \\
R &= \frac{B}{A}; & \varepsilon &= \frac{\operatorname{const} \cdot u_2}{p_{11}}; \\
S &= \frac{C}{A}; & F &= - \frac{R \operatorname{const} \cdot u_{11}}{S p_{11}}; \\
a^2 &= S - \frac{R^2}{4}; & N &= -D. \\
t_1 &= q_1 + \frac{R}{2}; \\
t_2 &= q_2 + \frac{R}{2};
\end{aligned}$$

Полученное решение, учитывающее влияние инерционных сил потока, имеет скорее принципиальное значение, так как для газлифта это влияние относительно невелико при значительном осложнении решения.

Таким образом, практически рекомендуется осуществлять расчет газлифта по уравнению (17) или (18)—при отрицательном значении коэффициента, которое обеспечивает правильный расчет газлифта при относительном объемном газосодержании ξ в пределах от 0 до 0,95.

Уравнение (17) является неявной функцией безразмерных критериев вида

$$\frac{H \gamma_2}{p_{11}} = f \left(\frac{\lambda u_2^2}{g d}, \frac{u_{11}}{u_{11} + u_2}, \frac{p_2}{p_{11}}, \frac{p_{10}}{p_{11}}, \sin \alpha \right). \quad (22)$$

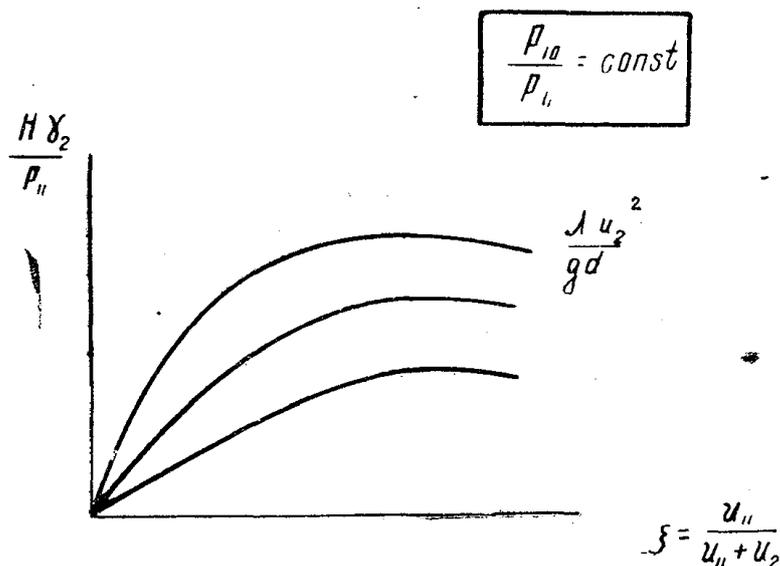
Для вертикальных газлифтов получим более простую зависимость

$$\frac{H \gamma_2}{p_{11}} = f \left(\frac{\lambda u_2^2}{g d}, \frac{u_{11}}{u_{11} + u_2}, \frac{p_{10}}{p_{11}} \right), \quad (23)$$

здесь допускается так же, что $p_2 \cong p_{11}$.

Для широкого практического решения вопроса о расчете газлифта должен быть построен ряд графиков в соответствии со схемой (фиг. 2).

Особо следует остановиться на определении давления p_{10} у основания газлифта. Это давление будет равно естественному давлению у башмака газлифта, созданному давлением столба жидкости и газа в пласте за вы-



Фиг. 2

четом падения давления за счет местных сопротивлений входа и падения давления, равного кинетической энергии смеси у основания газлифта. При выходе из газлифта давление p_2 равняется давлению атмосферы p_{11} плюс подпор созданных за выходным сечением газлифта. В частном случае, когда подпор относительно мал, $p_2 = p_{11}$.

С целью экспериментальной проверки полученного расчета газлифта автор воспользовался весьма обстоятельными опытами проф. Богдасарова, проведенными на специальной лабораторной установке газлифта в АзНИИ. Были сопоставлены результаты расчета с опытами, для которых ξ не превосходило значение 0,95. При расчете были приняты во внимание указанные проф. Богдасаровым местные сопротивления у башмака газлифта и образующийся подпор на выходе.

Из опытных данных определялись критерии

$$\frac{\lambda u_2}{g d}, \quad \xi = \frac{u_{11}}{u_{11} + u_2}, \quad \frac{p_{10}}{p_{11}} \text{ и } \frac{p_2}{p_{11}},$$

которые и подставлялись в уравнение (17), что позволило определить высоту газлифта, которая сопоставлена с истинной высотой газлифта, равной 19,3 м. Некоторые результаты этих вычислений даны в таблице.

№ п/п	
1	2,5"
2	2,5"
3	2,5"
0,47	0,831
1,802	8,339
0,8	0,91
0,518	0,918
2,0	9,3
1,965	1,965
2	2
0,02	0,08
0,928	0,725
19,3	19,3
19,0	19,6
<p>Незначительное расхождение между действительной и расчетной высотой следует отнести прежде всего за счет недостаточной точности данных относительно подпора и местного сопротивления у бабмака в экспериментальной установке.</p>	

Примечание

ТАБЛИЦА

ЛИТЕРАТУРА

1. Богдасаров В. Г.—Теория, расчет и практика газлифта. Гостонтехиздат, 1947.
2. Арманд А. А.—Изв. ВТИ, № 2, 1950.
3. Костерин С. И.—Изв. АН СССР, отд. техн. наук, декабрь, 1949.
4. Прандтль Л.—Гидромеханика, Москва, 1949, стр. 395 и 396.
5. Шваб В. А.—Гидравлика двухфазного потока в горизонтальных и вертикальных трубах. Труды ТЭМИИТ'а т. XIV, 1948.
6. Шваб В. А.—Теоретические основы установившегося движения двухфазного потока. Труды ТЭМИИТ'а т. XV, 1949.