

Расчёт трубопроводов.**Простой трубопровод.**

Простым трубопроводом (ПТ) называют трубопровод без разветвлений (рис.3.13), по которому движение жидкости осуществляется благодаря тому, что энергия потока рабочей жидкости в начале трубопровода на выходе из питателя ($z_1 + p_1/\rho g + V_1^2/2g$) больше, чем на входе в приемник в конце трубопровода ($z_2 + p_2/\rho g + V_2^2/2g$).

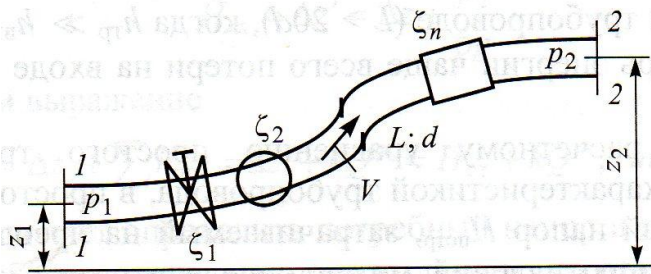


Рис. 3.13. Схема простого трубопровода

В качестве питателей и приемников используют различные гидроустройства - насосы, гидродвигатели, аккумуляторы, баки и др.

Насос - гидроустройство, преобразующее механическую энергию твердого тела в механическую энергию потока РЖ.

Гидродвигатель - гидроустройство, преобразующее механическую энергию потока рабочей жидкости в механическую энергию твердого тела.

ПТ постоянного сечения, расположенный в пространстве произвольно (рис.3.13), может иметь как постоянное сечение по всей длине, так и состоять из ряда последовательно соединенных участков различного диаметра.

При расчётах ПТ исходным является уравнение баланса напоров (уравнение Бернулли), записанное для движения потока жидкости от сечения 1-1 (на выходе из питателя и входе в трубопровод) и до сечения 2-2 (при выходе потока из трубопровода и входе в приемник).

При установившемся движении уравнение баланса напоров имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Sigma h_{ном} .$$

Из этого уравнения можно определим суммарные потери напора:

$$\Sigma h_{пот} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

на преодоление гидравлических сопротивлений в трубопроводе между сечениями 1-1 и 2-2, определяемыми потерями на трение $h_{мп} = \lambda(L/d)(V^2/2g)$ и потерями в МГС $h_{м.с.} = \zeta \Sigma V^2/2g$, к которым относятся потери на входе потока из питателя в трубопровод и при выходе потока из трубопровода в приемник.

В длинном трубопроводе ($L > 20d$), когда $h_{мп} \gg h_{вх} + h_{вых}$, при подсчёте потерь энергии чаще всего **потери на входе и выходе не учитывают.**

В результате получается упрощённое расчётное уравнение ПТ, называемое характеристикой трубопровод:

$$H_{потр} = \Sigma h_{пот} = kQ^m$$

(которое показывает, что в ПТ потребный напор трубопровода $H_{номр}$ затрачивается на преодоление гидравлических сопротивлений),

где k - коэффициент характеристики сопротивления трубопровода и m - показатель, зависящие от режима течения жидкости в трубопроводе.

Для упрощения расчетов суммарные потери $\Sigma h_{ном}$ представляют как потери на эквивалентном трубопроводе без МГС в виде:

$$h_{мп} = \lambda [(L + L_{экр})/d] (V^2/2g),$$

где $L_{экр} = \zeta \dot{d}/\lambda$ - длина эквивалентного трубопровода (приведённая длина), на котором потери энергии равноценны потерям на МГС, т.е. $\lambda (L_{экр}/d) (V^2/2g) = \zeta \dot{d} (V^2/2g)$.

Из уравнения баланса напоров после исключения скоростных напоров ввиду их малости по сравнению с другими потерями и замены $\Delta z = (z_2 - z_1)$ получим:

$$\frac{p_1}{\rho g} = \Delta z + \frac{p_2}{\rho g} + \Sigma h_{пот}.$$

Пьезометрическая высота $p_1/\rho g$, называемая также потребным напором $H_{номр}$ трубопровода, обеспечивает заданные величины давления и расхода в конечной точке трубопровода. Благодаря этому, в процессе движения поток жидкости поднимается на высоту Δz , преодолевает гидравлические сопротивления, а в конце трубопровода создает давление p_2 .

Обозначим через $\Delta z' = \Delta z + p_2/\rho g$ некоторую высоту подъема жидкости (высота подъема на участке 1-2 и пьезометрическая высота в конце трубопровода), иногда называемую статическим напором, т.е.

$$H_{ст} = \Delta z' = \Delta z + p_2/\rho g.$$

Тогда имеем выражение:

$$H_{потр.} = \Delta z' + \Sigma h_{пот} = \Delta z' + kQ^m = H_{ст} + kQ^m, \quad m=1 \text{ или } 2,$$

которое позволяет определить потребный напор и построить зависимость напора от расхода жидкости, протекающей по трубопроводу (рис.3.14).

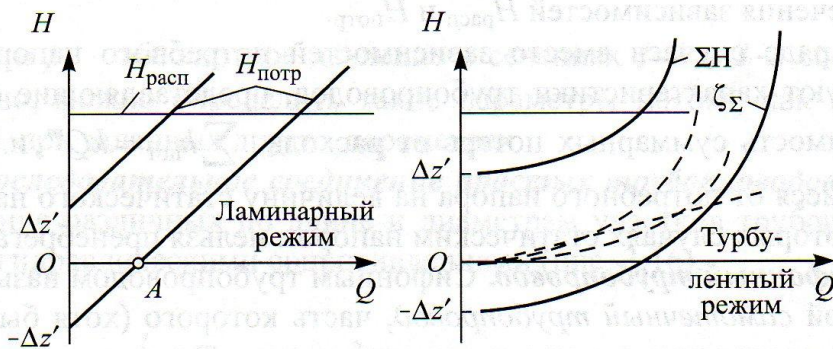


Рис. 3.14. Зависимости потребного напора от расхода жидкости, протекающей по трубопроводу

да:

- при ламинарном режиме течения жидкости по трубопроводу зависимость потребного напора от расхода - линейная ($m = 1$);
- при турбулентном - параболическая ($m = 2$).

Статический напор $\Delta z' = H_{ст}$ является положительной величиной в том случае, когда жидкость движется вверх по трубопроводу или перетекает в полость с повышенным давлением, и отрицательной - при движении жидкости вниз или перетекании в полость с разрежением, т.е. $-\Delta z' = -H_{ст}$ (самотёк). Точка А на рис.3.14 соответствует Q_A расходу в режиме самотёка за счет разности нивелирных высот.

Когда трубопровод лежит в горизонтальной плоскости и противодействие отсутствует, т.е. $\Delta z' = 0$, кривая потребного напора (пунктирная линия на рис.3.14) проходит через начало координат.

При ЛР течения по трубопроводу потери напора определяются как:

$$\Sigma h_{пот} = 128 \nu (L + L_{экв}) Q / (\pi g d^4) = kQ,$$

где $k = 128 \nu (L + L_{экв}) / (\pi g d^4)$.

При ТР течения имеем:

$$\Sigma h_{пот} = 16 (\zeta_{\Sigma} + \lambda L / d) Q^2 / (2 \pi^2 g d^5) = 0,0827 (L + L_{экв}) Q^2 / d^5 = kQ^2,$$

где $k = 8 (\zeta_{\Sigma} + \lambda L / d) / (\pi^2 g d^5) = 0,0827 \lambda (L + L_{экв}) / d^5$.

Наличие располагаемого напора - $H_{расп} = (z_1 + p_1 / \rho g) - (z_2 + p_2 / \rho g)$, позволяет определить расход (точка пересечения $H_{расп}$ и $H_{потр}$).

В ряде случаев вместо зависимостей требуемого напора используют характеристики трубопроводов, представляющие собой зависимость суммарных потерь от расхода $\Sigma h_{\text{пот}} = kQ^m$ и отличающиеся от требуемого напора на величину статического напора. В некоторых случаях этим статическим напором пренебрегать нельзя.

Сифонный трубопровод.

Сифонным трубопроводом называют такой простой самотечный трубопровод, часть которого (хотя бы одна точка) расположена выше пьезометрического уровня питающего его резервуара (рис.3.15).

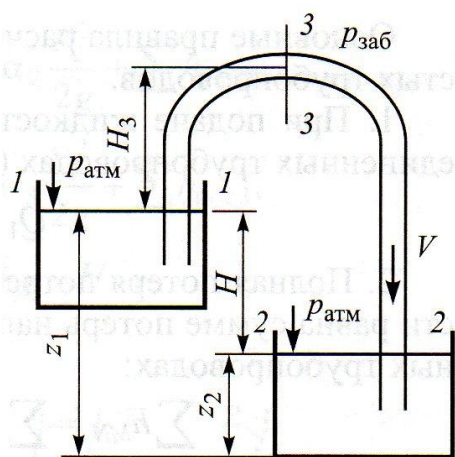


Рис. 3.15. Схема сифонного трубопровода

Жидкость движется по сифонному трубопроводу за счёт разности уровней, причём сначала она поднимается на высоту H_3 от СП $1-1$ с атмосферным давлением, затем опускается на высоту (H_3+H) .

Для того чтобы началось движение жидкости по сифонному трубопроводу, необходимо весь объём трубопровода заполнить жидкостью.

Запишем уравнение Бернулли трубопровода для сечений $1-1$ и $2-2$:

$$z_1 = z_2 + \Sigma h_{\text{пот}} \quad \text{или} \quad \Delta z = kQ^m,$$

т.е. расход через сифонный трубопровод определяется разностью уровней напора и сопротивлением трубопровода и не зависит от высоты подъема H_3 .

С увеличением высоты подъема H_3 абсолютное давление $p_{\text{заб}}$ в сечении $3-3$ понижается. Когда это давление становится равным $p_{\text{нп}}$, возникает кавитация и уменьшается расход.

При скоплении паров образуется газовая пробка, происходит разрыв сплошности потока и подача жидкости прекращается.

Из уравнения Бернулли:

$$\frac{p_1}{\rho g} = H_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} + \Sigma h_{\text{пот}1-3},$$

где p_1 и p_3 - абсолютное давление в сечениях $1-1$ и $3-3$, можно определить такие параметры потока, как H_3 , p_3 или Q , при заданных других параметрах.

Последовательное соединение ПТ - соединение различных по длине и диаметрам участков трубопроводов с гидравлическими сопротивлениями (рис.3.16).

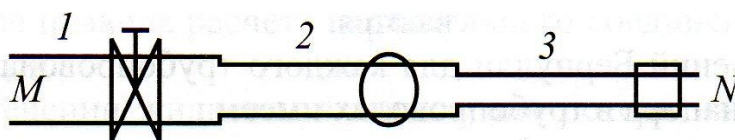


Рис. 3.16. Схема последовательного соединения трубопроводов

Основные правила расчёта последовательного соединения трубопроводов:

1. При подаче жидкости расход во всех последовательно соединённых трубопроводах (1-3) д.б. одинаковым:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q.$$

2. Полная потеря потребного напора при движении заданного расхода жидкости равна сумме потерь напора во всех последовательно соединённых трубопроводах:

$$\Sigma h_{MN} = \Sigma h_{nom1} + \Sigma h_{nom2} + \Sigma h_{nom3}$$

При этом

$$H_{потр} = z_M - z_N + \frac{\alpha_M V_M^2 - \alpha_N V_N^2}{2g} + \Sigma h_{MN} + \frac{p_N}{\rho g} = \Delta z' + cQ^2 + kQ^m,$$

где $\Delta z' = z_M - z_N + p_N/\rho g$; $c = (\alpha_M/S_M^2 - \alpha_N/S_N^2)/2g$.

Способ графического решения для последовательного соединения трубопроводов показан на рис.3.17.

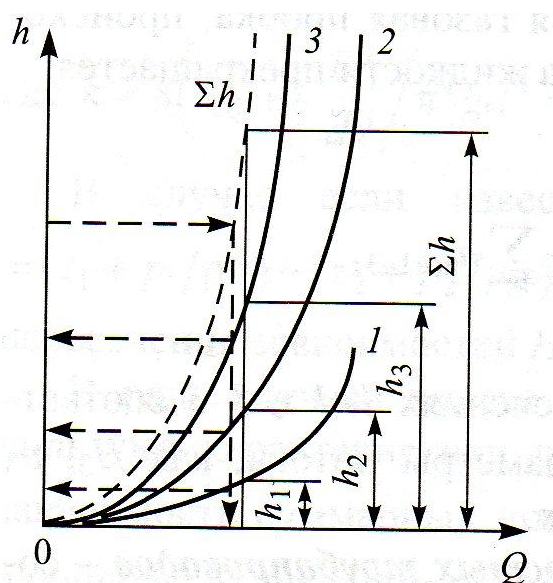


Рис. 3.17. Построение характеристик последовательно соединённых трубопроводов

Параллельное соединение трубопроводов.

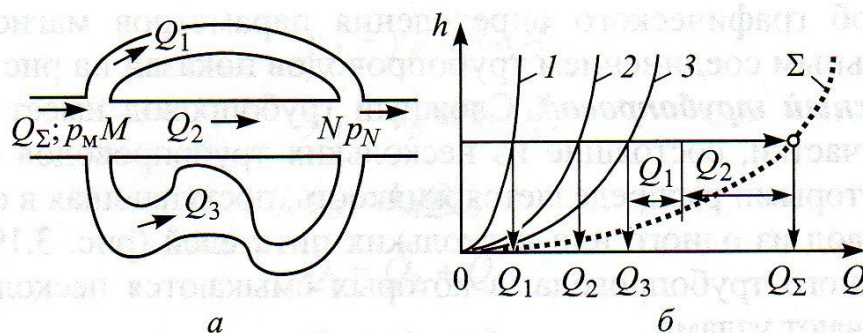


Рис. 3.18. Схема (а) и построение характеристик параллельно соединенных трубопроводов (б)

На рис.3.18 показано параллельное соединение нескольких ПТ между точками - узлами М и N :

- полные напоры в узлах M и N : H_M и H_N ;
- расход в основной магистрали Q_Σ ;
- расходы в параллельных трубопроводах Q_1, Q_2, Q_3 ;
- потери напора в трубопроводах соответственно h_1, h_2, h_3 ;
- потери в узлах - местных сопротивлениях и скоростные напоры не учитываются.

Из уравнений Бернулли для каждого трубопровода имеем:

$$z_M + \frac{p_M}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_N + \frac{p_N}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \Sigma h_{nom1} ;$$

$$z_M + \frac{p_M}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = z_N + \frac{p_N}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Sigma h_{nom2} ;$$

$$z_M + \frac{p_M}{\rho g} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2g} = z_N + \frac{p_N}{\rho g} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2g} + \Sigma h_{nom3} ;$$

$$\Sigma h_{nom1} = \Sigma h_{nom2} = \Sigma h_{nom3} = H_M - H_N ,$$

Окончательно получаем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = Q_1 + Q_2 + Q_3; \\ \Sigma h_{nom1} = k_1 Q_1^{m1}; \\ \Sigma h_{nom2} = k_2 Q_2^{m2}; \\ \Sigma h_{nom3} = k_3 Q_3^{m3}. \end{array} \right. \Sigma h_{nom1} = \Sigma h_{nom2} = \Sigma h_{nom3} = H_M - H_N ,$$

где 1-е уравнение описывает баланс расходов;

2, 3 и 4-е уравнения - потери напора соответственно для каждого трубопровода, определяемые характеристиками ПТ;

5-е уравнение - равенство потерь в параллельных трубопроводах.

Эта система позволяет определить необходимые параметры трубопроводов.

Основные правила расчёта параллельного соединения ПТ:

1. При течении жидкости в магистрали потери напора в каждой из всех параллельно соединённых трубопроводов одинаковые.

2. Полный расход в магистрали равен сумме расходов во всех параллельно соединённых трубопроводах.

Замечание: Как правило, при расчётах проводят замену параллельных трубопроводов эквивалентным трубопроводом, приводя эту схему к ПТ с определением параметров из следующих условий:

$$Q_{\text{экв}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 ; \quad \sqrt{\frac{h_1}{k_{\text{экв}}}} = \sqrt{\frac{h_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{h_1}{k_2}} + \sqrt{\frac{h_1}{k_3}} ; \quad \frac{1}{\sqrt{k_{\text{экв}}}} = \sum \frac{1}{\sqrt{k_i}}$$

Способ графического решения для магистрали с параллельным соединением трубопроводов показан на рис.3.18, б.

Сложный трубопровод.

Сложный трубопровод (СТ) имеет разветвлённые участки, состоящие из нескольких трубопроводов (ветвей), между которыми распределяется жидкость, поступающая в СТ из одного питателя (рис.3.19) или нескольких питателей.

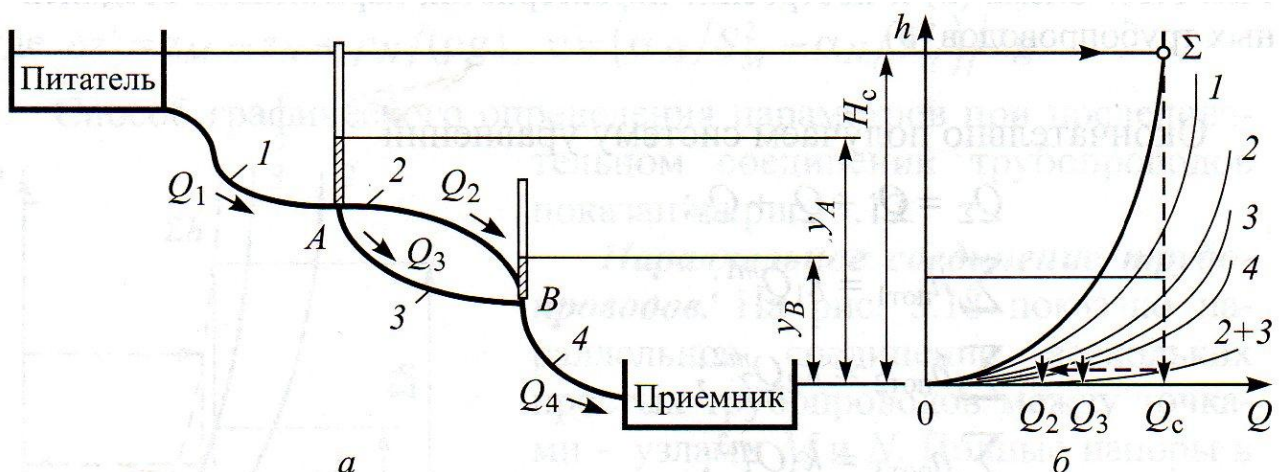


Рис. 3.19. Схема (а) и построение характеристик (б) сложного трубопровода

Сечения СТ, в которых смыкаются несколько ветвей, называются узлами.

Для расчёта параметров СТ и входящих в него ветвей составляют систему уравнений, включающую в себя уравнения для одиночных ПТ и уравнения баланса расходов в узлах, которые устанавливают функциональные связи между параметрами, определяющими потоки жидкости в трубопроводах (размеры каналов, расходы и напоры).

При расчёте СТ в основном пренебрегают местными потерями в узлах, на входе и выходе.

В подобных задачах, как правило, неизвестны расходы в каждом из трубопроводов. Для расчёта СТ, показанного на рис.3.19, а, в каждый узел (А и В) устанавливают пьезометры и получают четыре простых трубопровода, для которых записывают уравнения, определяющие характеристики трубопроводов. Чтобы система уравнений была полной, необходимо дополнить её уравнениями балансов расходов в узлах А и В.

Система уравнений для расчёта СТ имеет вид:

$$\begin{cases} H - y_A = k_1 Q_1^2; \\ y_A - y_B = k_2 Q_2^2; \\ y_A - y_B = k_3 Q_3^2; \\ y_B = k_4 Q_4^2; \\ Q_1 = Q_2 + Q_3 = Q \\ Q_2 + Q_3 = Q_4 \end{cases}$$

Имеется шесть уравнений для определения параметров двух узлов и четырёх трубопроводов. Требуется рассчитать расходы $Q_1; Q_2; Q_3; Q_4$.

С учётом правил соединения параллельных трубопроводов получаем:

$$H = k_1 Q_1^2 + k_2 Q_2^2 + k_4 Q_4^2, \quad k_2 Q_2^2 = k_3 Q_3^2.$$

Таким образом - $Q_1 = Q_2 + Q_3 = Q_4$.

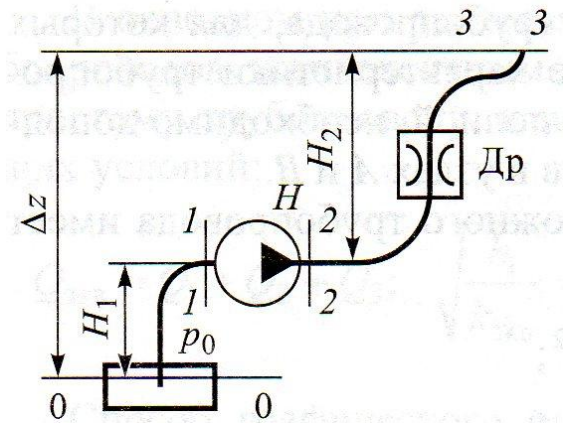
Алгоритм графического определения (рис.3.19, б) параметров СТ:

- 1) в каждый узел устанавливают пьезометры и назначают уровни y_A и y_B ;
- 2) разбивают сложный трубопровод на простые и строят $k_1 Q_1^2; k_2 Q_2^2; k_3 Q_3^2; k_4 Q_4^2$;
- 3) эквивалент параллельных трубопроводов (2+3) получают сложением Q_{2i} и Q_{3i} при H_i ;
- 4) для последовательных труб-дов находят сумму напоров $(h_{1i} + h_{2i} + h_{4i})$ по расходу Q_i ;
- 5) задавая H_c , получают $Q_c = Q = Q_1 = Q_4 = Q_2 + Q_3$;
- 6) по сумме расходов $(Q_2 + Q_3)$ находим Q_2 и Q_3 .

Трубопровод с насосной подачей.

Устройства, преобразующие механическую энергию твёрдого тела в механическую энергию потока жидкости, называют **насосами**.

Напор насоса (энергия, сообщаемая насосом единице силы тяжести перекачиваемой жидкости) затрачивается на изменение напора потока и преодоление сопротивлений в трубопроводе.



В разомкнутом трубопроводе, показанном на рис.3.20:

- H_1 - геометрическая высота всасывания;
- 0-1** - линия всасывания;
- H_2 - геометрическая высота нагнетания;
- 2-3** - линия нагнетания.

Жидкость через сечение 3-3 поступает из трубопровода потребителю.

Рис. 3.20. Схема трубопровода с насосной подачей

Уравнение Бернулли для расчёта трубопровода в сечениях **0-0** и **1-1** имеет вид:

$$\frac{p_0}{\rho g} = H_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \sum h_{0-1}$$

и отражает затраты энергии на подъём потока жидкости на высоту $H_1 = z_1 - z_0$ со скоростью V_1 и преодоление сопротивлений трубопровода **0-1**.

Преобразуем это уравнение следующим образом:

$$-\left(\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right) = H_1 - \frac{p_0}{\rho g} + \sum h_{0-1} .$$

Левая часть уравнения определяет напор потока жидкости на входе в насос.

Уравнение Бернулли для расчёта трубопровода в сечениях **2-2** и **3-3** имеет вид:

$$\frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = H_2 + \frac{p_3}{\rho g} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2g} + \sum h_{2-3}$$

и отражает баланс энергий на напорном трубопроводе **2-3**, где $H_2 = z_3 - z_2$.

Левая часть этого уравнения определяет напор потока жидкости на выходе из насоса.

Развиваемый насосом напор при условии, что $z_1 = z_2$, равен разности напоров на выходе и входе насоса. Из рассмотренных уравнений Бернулли получаем выражение:

$$H_n = \left(\frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right).$$

Из этих же уравнений можно видеть, что потребный напор для продвижения жидкости по трубопроводу с насосной подачей:

$$H_{\text{потр}} = H_1 + H_2 + \frac{p_3 - p_0}{\rho g} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2g} + \sum h_{0-1} + \sum h_{2-3} \quad \text{или}$$

$$H_{\text{потр}} = \Delta z + \frac{p_3 - p_0}{\rho g} + cQ^2 + kQ^m,$$

где $\Delta z = H_1 + H_2$ - полная геометрическая высота подъема жидкости (для замкнутого трубопровода $\Delta z = 0$);

$cQ^2 = \alpha_3 V_3^2 / 2g$ - скоростной напор в сечении 3-3;

$kQ^m = \sum h_{0-1} + \sum h_{2-3}$ - суммарные потери.

Иногда статический напор обозначают $\Delta z' = \Delta z + (p_3 - p_0) / \rho g$, тогда

$$H_{\text{потр}} = \Delta z' + cQ^2 + kQ^m.$$

Для работы системы в установившемся режиме должно выполняться равенство

$$\underline{H_n = H_{\text{потр}}}.$$

При совместной работе трубопровода и насосной системы рабочие характеристики насоса $H_n = f(Q)$ и трубопроводной системы $H_{\text{потр}} = f(Q)$ строят на одном графическом поле в одинаковом масштабе. Точку пересечения построенных характеристик называют **рабочей точкой установившегося режима**, и она соответствует потребляемому напору и расходу жидкости.