

«Промышленное насосное оборудование»

Кавитация и NPSH

Кавитация появляется в том случае, если давление жидкости в насосе падает до давления ее насыщенных паров, см. рис. 2.2.9 и 2.2.10.

При падении давления на всасывающем патрубке насоса до давления насыщенных паров жидкости (рис. 2.2.10, желтая точка), из нее начинает выделяться растворенный газ. Образуются пузырьки.

При последующем увеличении давления происходит мгновенное схлопывание пузырьков (см. рис. 2.2.10, красная точка), сопровождаемое выделением энергии. Поверхности рабочего колеса испытывают тепловое, электрохимическое и ударное воздействие, вследствие чего разрушаются. Степень повреждения при этом зависит от материала, из которых изготовлены колеса. Нержавеющая сталь более устойчива к кавитации, чем бронза, а бронза — более стойкая, чем чугун (см. раздел 1.6.3).

Развивающаяся кавитация вызывает срыв подачи насоса, см. рис. 2.2.11. Повреждения, вызванные кавитацией, зачастую обнаруживаются только после демонтажа насосной части.



Рис. 2.2.9: Взрыв кавитационных пузырьков на задней стороне лопаток рабочего колеса

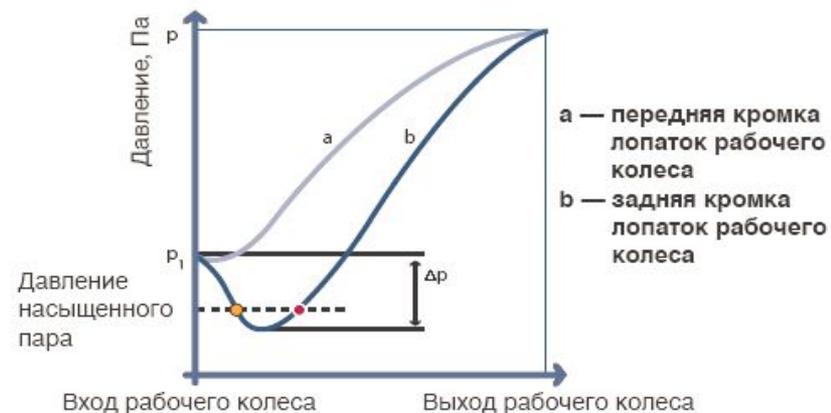


Рис. 2.2.10: Изменение давления в центробежном насосе

«Промышленное насосное оборудование»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

Кавитационный расчет

Для проверки работоспособности насоса при риске возникновения в нем кавитации пользуются следующей формулой:

$$h_{\text{макс}} = H_b - H_f - \text{NPSH} - H_V - H_S$$

$h_{\text{макс}}$ — максимально допустимая высота всасывания (если значение больше нуля) или необходимый подпор (если значение меньше нуля).

H_b — атмосферное давление со стороны насоса; это максимальная теоретическая высота всасывания, см. рис. 2.2.13.

H_f — потери давления на трение со стороны всасывания.

NPSH — аналог понятия «кавитационный запас» (значение определяется по характеристике NPSH при максимальном расходе), см. рис. 2.2.12.

H_V — давление насыщенных паров перекачиваемой жидкости при определенной температуре; более подробная информация о давлении насыщенных паров воды имеется в приложении D.

H_S — запас надежности. Экспериментальная величина, обычно равная 0,5–1 м, а для жидкостей, содержащих газ, — до 2 м, см. рис. 2.2.15.



Рис. 2.2.11: Характеристика насоса при кавитации

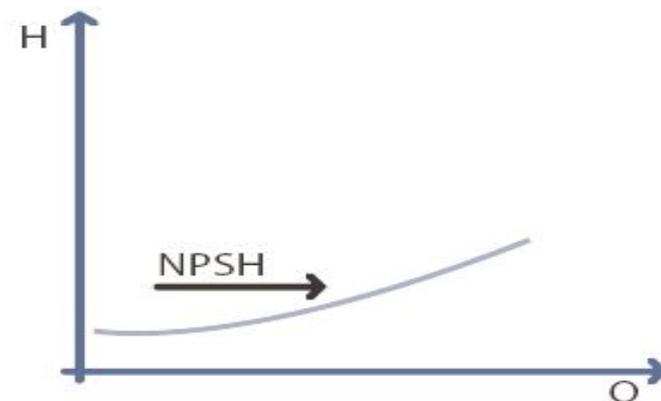


Рис. 2.2.12: NPSH характеристика

«Промышленное насосное оборудование»

Параметр NPSH представляет собой минимальное абсолютное давление, при котором в насосе не возникает кавитация, т.е. он отражает «требования» насоса к системе, см. рис. 2.2.13.

Различают следующие понятия:

NPSHT — значение NPSH, требуемое насосом

NPSHF — значение NPSH, обеспечиваемое системой (абсолютное давление, которое существует на входе в насос в данной системе).

Кривую NPSH для насоса определяют на основании стандарта ISO 9906. Для этого, задавшись определенным расходом, измеряют перепад давления между напорным и всасывающим патрубком насоса, постепенно понижая давление на входе. Как только перепад давления уменьшится на 3%, измерения прекращают, а полученное значение NPSH заносят в таблицу. Составив таблицу для всего диапазона подач, получают характеристику NPSH.

Высота над уровнем моря, м	Барометрическое давление P_b , бар	Барометрическое давление, выраженное в метрах водяного столба H_b , м	Точка кипения воды, °C
0	1,013	10,33	100
500	0,935	9,73	99
1000	0,899	9,16	93
2000	0,795	8,10	93

Рис. 2.2.13: Барометрическое давление относительно уровня моря

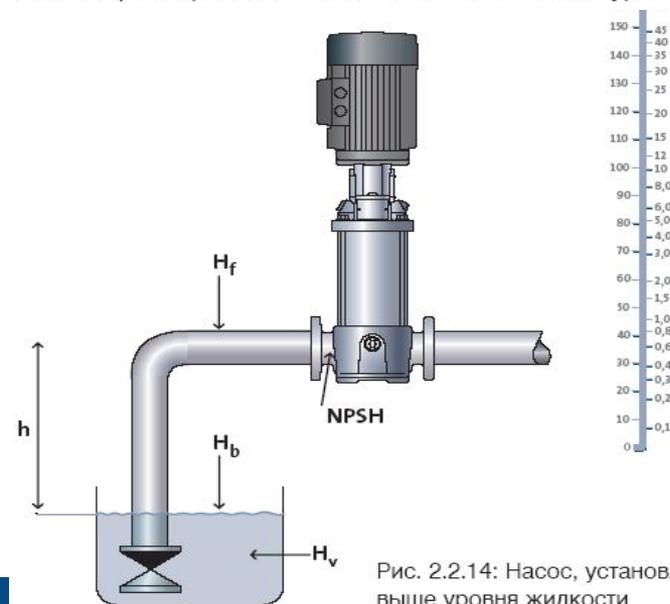


Рис. 2.2.14: Насос, установленный выше уровня жидкости

Давление насыщенного пара p и плотность воды ρ при различных температурах

SERVICE

t (°C)	T (K)	P (бар)	ρ (кг/м ³)	t (°C)	T (K)	P (бар)	ρ (кг/м ³)	t (°C)	T (K)	P (бар)	ρ (кг/м ³)
0	273,15	0,00611	0999,8					138	411,15	3,414	927,6
1	274,15	0,00657	0999,9	61	334,15	0,2086	982,6	140	413,15	3,614	925,8
2	275,15	0,00706	0999,9	62	335,15	0,2184	982,1	145	418,15	4,155	921,4
3	276,15	0,00758	0999,9	63	336,15	0,2286	981,6	150	423,15	4,760	916,8
4	277,15	0,00813	1000,0	64	337,15	0,2391	981,1				
5	278,15	0,00872	1000,0	65	338,15	0,2501	980,5	155	428,15	5,433	912,1
6	279,15	0,00935	1000,0	66	339,15	0,2615	979,9	160	433,15	6,181	907,3
7	280,15	0,01001	999,9	67	340,15	0,2733	979,3	165	438,15	7,008	902,4
8	281,15	0,01072	999,9	68	341,15	0,2856	978,8	170	443,15	7,920	897,3
9	282,15	0,01147	999,8	69	342,15	0,2984	978,2	175	448,15	8,924	892,1
10	283,15	0,01227	999,7	70	343,15	0,3116	977,7				
								180	453,15	10,027	886,9
11	284,15	0,01312	999,7	71	344,15	0,3253	977,0	185	458,15	11,233	881,5
12	285,15	0,01401	999,6	72	345,15	0,3396	976,5	190	463,15	12,551	876,0
13	286,15	0,01497	999,4	73	346,15	0,3543	976,0	195	468,15	13,987	870,4
14	287,15	0,01597	999,3	74	347,15	0,3696	975,3	200	473,15	15,50	864,7
15	288,15	0,01704	999,2	75	348,15	0,3855	974,8				
16	289,15	0,01817	999,0	76	349,15	0,4019	974,1	205	478,15	17,243	858,8
17	290,15	0,01936	998,8	77	350,15	0,4189	973,5	210	483,15	19,077	852,8
18	291,15	0,02062	998,7	78	351,15	0,4365	972,9	215	488,15	21,060	846,7
19	292,15	0,02196	998,5	79	352,15	0,4547	972,3	220	493,15	23,198	840,3
20	293,15	0,02337	998,3	80	353,15	0,4736	971,6	225	498,15	25,501	833,9
21	294,15	0,02485	998,1	81	354,15	0,4931	971,0	230	503,15	27,976	827,3
22	295,15	0,02642	997,8	82	355,15	0,5133	970,4	235	508,15	30,632	820,5
23	296,15	0,02808	997,6	83	356,15	0,5342	969,7	240	513,15	33,478	813,6
24	297,15	0,02982	997,4	84	357,15	0,5557	969,1	245	518,15	36,523	806,5
25	298,15	0,03166	997,1	85	358,15	0,5780	968,4	250	523,15	39,776	799,2
26	299,15	0,03360	996,8	86	359,15	0,6011	967,8	255	528,15	43,246	791,6
27	300,15	0,03564	996,6	87	360,15	0,6249	967,1				
28	301,15	0,03778	996,3	88	361,15	0,6495	966,5	260	533,15	46,943	783,9
29	302,15	0,04004	996,0	89	362,15	0,6749	965,8	265	538,15	50,877	775,9
30	303,15	0,04241	995,7	90	363,15	0,7011	965,2	270	543,15	55,058	767,8
								275	548,15	59,496	759,3
31	304,15	0,04491	995,4	91	364,15	0,7281	964,4	280	553,15	64,202	750,5
32	305,15	0,04753	995,1	92	365,15	0,7561	963,8				
33	306,15	0,05029	994,7	93	366,15	0,7849	963,0	285	558,15	69,186	741,5
34	307,15	0,05318	994,4	94	367,15	0,8146	962,4	290	563,15	74,461	732,1
35	308,15	0,05622	994,0	95	368,15	0,8453	961,6	295	568,15	80,037	722,3
36	309,15	0,05940	993,7	96	369,15	0,8769	961,0	300	573,15	85,927	712,2
37	310,15	0,06274	993,3	97	370,15	0,9094	960,2	305	578,15	92,144	701,7
38	311,15	0,06624	993,0	98	371,15	0,9430	959,6	310	583,15	98,700	690,6
39	312,15	0,06991	992,7	99	372,15	0,9776	958,6				
40	313,15	0,07375	992,3	100	373,15	1,0133	958,1	315	588,15	105,61	679,1

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

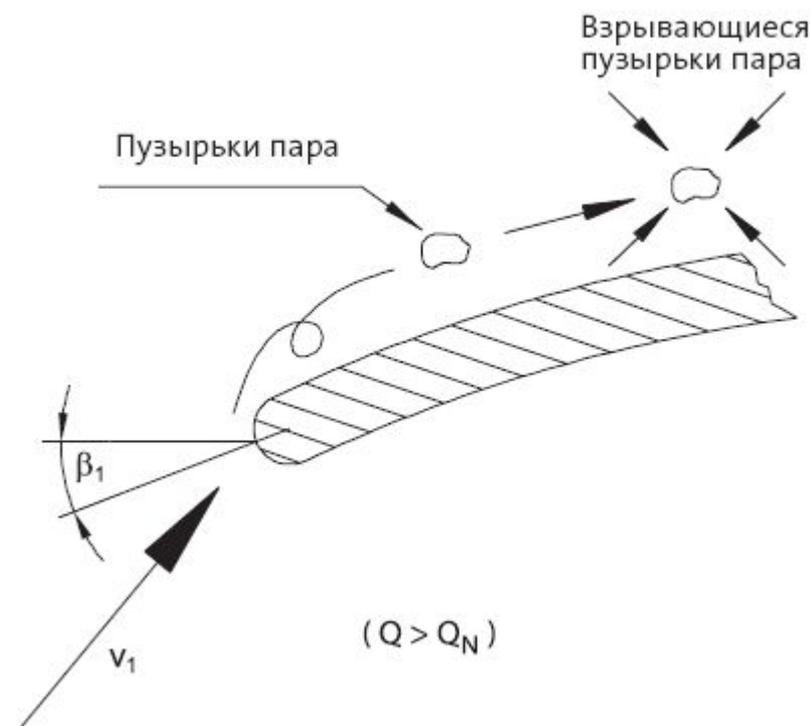
Кавитация образуется при возникновении и разрушении пузырьков пара в жидкости. Пузырьки пара образуются при условии, когда местное статическое давление в движущейся жидкости понижается до уровня давления насыщенных паров или ниже его при температуре окружающей среды. Когда пузырек или полость перемещается с потоком в зону высокого давления, он быстро разрушается. Взрыв пузырька приводит к возникновению в жидкости временной ударной волны чрезвычайно высокого местного давления. Если взрыв пузырьков происходит вблизи поверхности, удары давления, если они возникают постоянно, в конце концов, разрушат поверхностный материал. Явление кавитации обычно возникает в центробежных насосах в местах, расположенных вблизи входных кромок лопастей рабочего колеса (см. Рис.7).

Кавитация может также понизить характеристику Q/H насоса и его эффективность. Кавитирующий насос издает характерный дребезжащий звук, как будто через насос прокачивается песок. Ни один из материалов, используемых в конструкции насосов, не сможет полностью противостоять кавитации, поэтому необходимо проявить особое внимание ситуациям, создающим угрозу возникновения кавитации. Следы износа от кавитации обычно носят локальный характер и представляют собой глубокие поверхностные раковины с острыми краями. Глубина этих раковин может достигать нескольких миллиметров (обратите внимание на Рис.8). Обычно рабочие характеристики насосов, опубликованные для насосов погружного типа, представлены таким образом, что в нормально установленном в жидкости насосе кавитация не возникнет до тех пор, пока условия его эксплуатации будут находиться в допустимых пределах характеристики Q/H.

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

Рис. 7 Перекачиваемая жидкость ударяется о входную кромку лопасти рабочего колеса под углом отличным от угла лопатки. Вихри и зоны пониженного давления образуются на обратной стороне рабочего колеса. Если давление становится ниже давления насыщенного пара, то возникают пузырьки пара. Переместившись совместно с потоком в зону повышенного давления, они неизбежно взорвутся. Это может привести к образованию раковин и коррозии на поверхности, расположенной рядом с областью повышенного давления.



«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

- Если насос погружного типа устанавливается в сухом исполнении с использованием всасывающего патрубка, то в этой ситуации необходимо проверить оборудование на возможность возникновения кавитации. В таких случаях используется концепция NPSH.
- 1.4.1 Определение NPSH
- NPSH является аналогом понятия кавитационного запаса и переводится как "суммарный напор всасывания при нагнетании". Приведенные ниже величины используются при расчете величины NPSH:
- h_t - высота всасывания
- h_A - разность высот между плоскостью отсчета и концом входной кромки лопасти рабочего колеса
- H_{rt} - потери потока во всасывающем патрубке
- $V_{02/2g}$ - скоростной напор
- h - местная потеря давления на входной кромке лопасти рабочего колеса
- P_b - давление окружающей среды на уровне жидкости
- P_{min} - минимальное статическое давление в насосе
- P_v - давление насыщенных паров

Напоры показаны на рисунке 9.

В целях избежания кавитации минимальное статическое давление в насосе (P_{min}) должно быть больше давления насыщенных паров жидкости, или

$$P_{min} > P_v$$

На рисунке 10 показан принцип распределения статического давления жидкости во всасывающей трубе, насосе и в напорной трубе при "сухой" установке насоса.

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

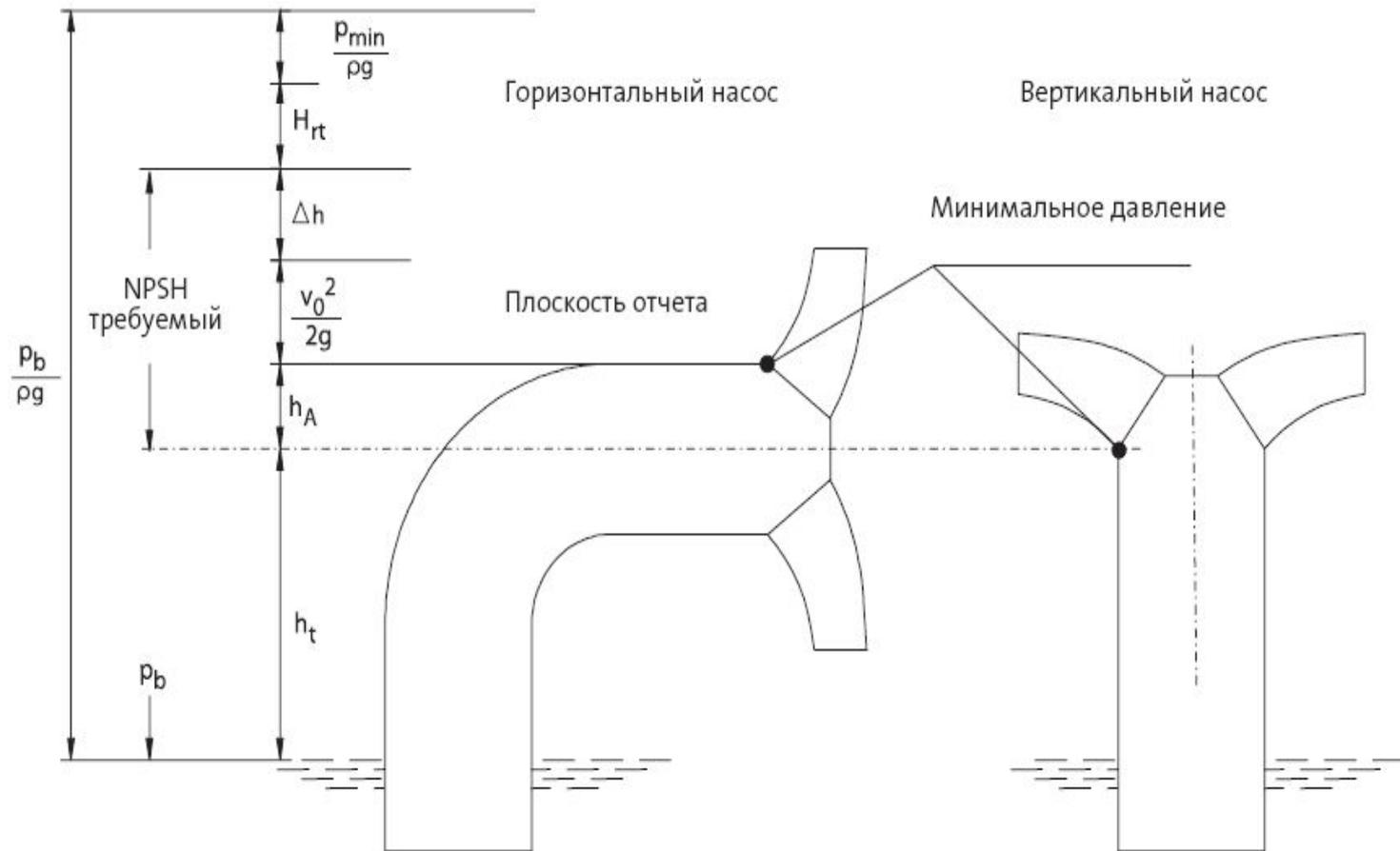
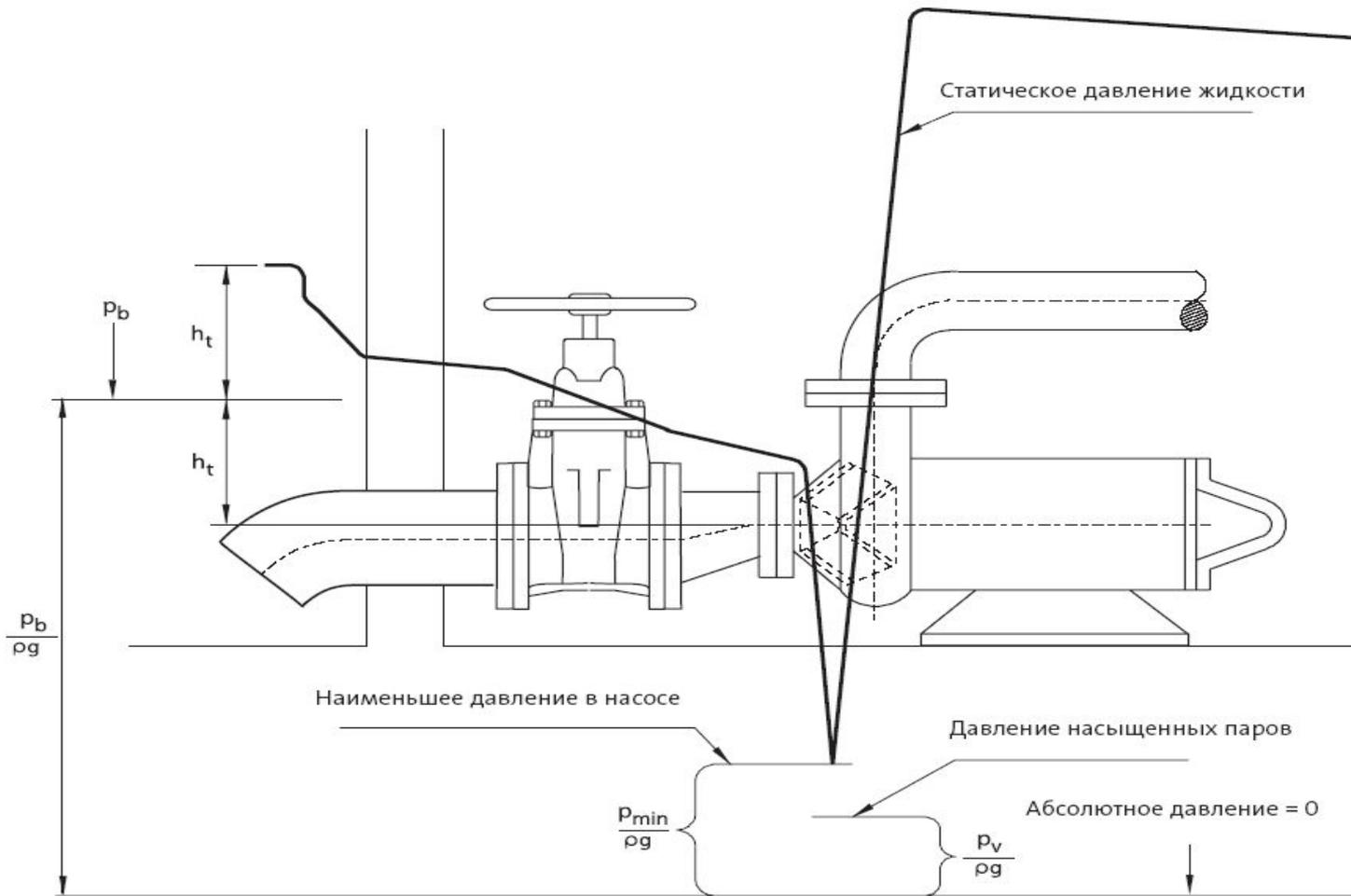


Рис. 9 Размеры и давления для расчета NPSH

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE



«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

1.4.2 Плоскость отсчета

- Плоскостью отсчета является плоскость, с помощью
- которой производится расчет NPSH. Она представляет собой горизонтальную плоскость, проходящую через центр окружности, описываемой
- концом входной кромки лопасти рабочего колеса.
- Для горизонтально устанавливаемых насосов плоскость отсчета совпадает с осевой линией вала
- двигателя. Для вертикально устанавливаемых насосов положение плоскости отсчета определяется
- производителем насоса.

1.4.3 Потребная величина NPSH

Потребная величина NPSH может быть найдена из уравнения:

$$\text{NPSH}_{\text{потребн.}} = h_A + V_0^2 / 2g + h \quad (12)$$

Это уравнение также называется "NPSH насоса".

Оно

может быть представлено в виде функции расхода, как показано на рисунке 11. Производитель насоса обязан обозначить параметры NPSH в виде цифровых величин или графика.

Любой насос в действительности будет иметь различные значения NPSH в зависимости от определения конкретной ситуации, как это видно на рисунке 12. В соответствии с установленными параметрами испытаний, используемыми производителями насосов исходя из ситуации, при которой

величина напора насоса уменьшается на 3% вследствие кавитации. Этой величине присвоено наименование NPSH3.

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

- Легкая кавитация может считаться для насоса безопасной при условии, что вблизи его конструктивных элементов, таких как рабочее колесо, не наблюдается взрывов пузырьков пара.
- Разброс значений различных NPSH достигает большей величины в насосах с рабочим колесом, в которой установлено минимальное число лопастей. Так, однолопастные рабочие колеса обладают наибольшим разбросом значений параметра NPSH, учитывающих различие, вызываемое падением параметра $NPSH_3$, при этом тестовые испытания давали слишком благоприятные результаты. Поэтому параметр $NPSH_{потребн.}$, базирующийся на правиле 3% от установленной величины, является слабым основанием для оценки риска возможного возникновения кавитации при использовании насоса с минимальным количеством лопастей в рабочем колесе.

Параметр $NPSH_{потребн.}$, указываемый производителем насоса в принципе должен гарантировать безаварийную работу насоса в случае, если насос будет эксплуатироваться в условиях превышения данного параметра. Это особенно принципиально для насосов, перекачивающих сточные воды и в рабочем колесе которых имеется малое количество лопастей. Проблема заключается в том, что в данном случае не существует точных методов испытаний и установления соответствующих значений параметра NPSH.

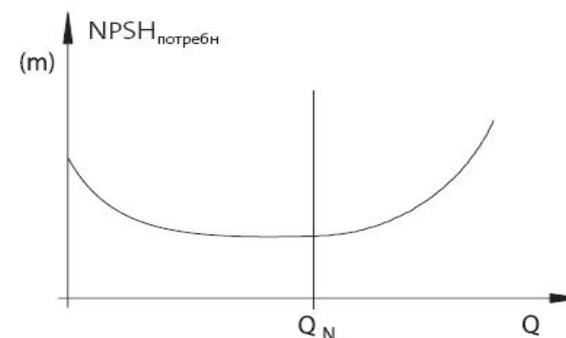


Рис. 11 Типичное распределение требуемого значения параметра NPSH по отношению к расходу потока в насосе.

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

- **1.4.4 Доступные значения параметра NPSH**
- Доступное значение параметра NPSH определяет величину давления на всасывании, доступную в определённых условиях. Такое значение параметра NPSH может быть названо как NPSH насосной станции.
- $NPSH_{\text{доступн.}} = (P_b/p_g) - H_{rt} - h_t - (P_v/p_g)$ (13)
- Параметр h_t имеет положительное значение при условии, что плоскость отсчета расположена над поверхностью жидкости, и отрицательное, если она расположена под ней.
- Значение доступного NPSH определяется разработчиком насосной станции.
- На рисунке 13 представлена зависимость давления насыщенных паров от температуры воды.
- На рисунке 14 представлена зависимость атмосферного давления от высоты над уровнем моря.

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

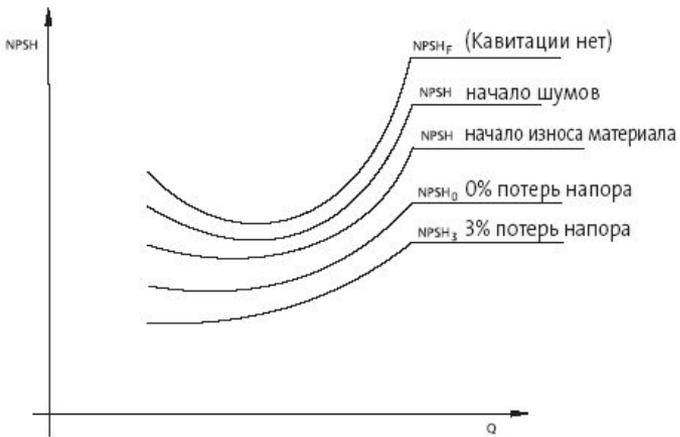


Рис. 12 Различные эпюры параметра NPSH

Температура (°C)

Напор (м)

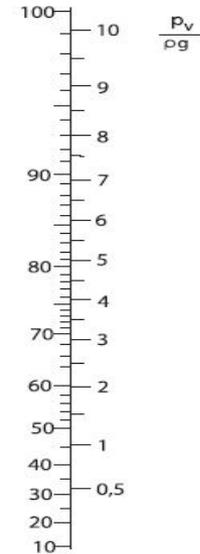
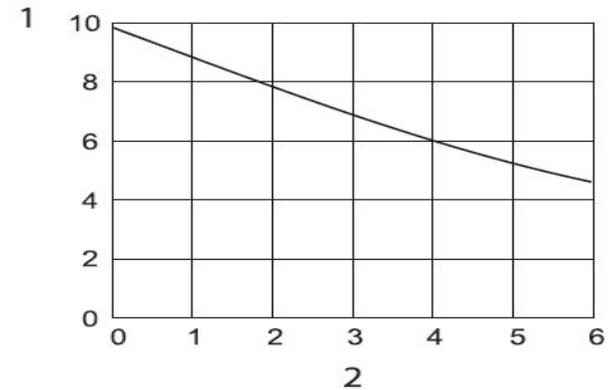


Рис. 13 Давление насыщенных температуры.



- 1 - Атмосферное давление (в метрах водяного столба)
2 - Высота над уровнем моря (км)

Рис. 14 Атмосферное давление как функция высоты над уровнем моря

«Теория и практика систем водоотведения»

SERVICE ANYWHERE YOU ARE

- **1.4.5 Запас надежности по параметру NPSH**
- $NPSH_{\text{доступный}} - NPSH_{\text{требуемый}} + \text{Запас надёжности}$
- Запас надежности по параметру NPSH должен быть достаточным для всех возможных ситуаций, при которых реальные условия эксплуатации насоса могут отличаться от теоретически обоснованных. Предполагаемые потери во всасывающей патрубке могут быть определены не точно, и фактические эксплуатационные параметры насоса могут отличаться от теоретических вследствие разброса параметра Q/H и не точно подсчитанной величины сопротивления в трубе. Опасная кавитация может возникнуть раньше, чем ожидалось, или при больших по сравнению с $NPSH_3$ значениях параметра NPSH (см. Рис.12). Используемые при проектировании входных кромок лопастей рабочего колеса технологические варианты могут повлиять на характер проявления кавитации. Форма всасывающей трубы может также оказать влияние на величину требуемого параметра NPSH.

Для горизонтально устанавливаемых насосов с прямыми всасывающими патрубками запас надежности по параметру NPSH в размере от 1 до 1,5 метров вполне допустим.

Для вертикально устанавливаемых насосов запас надежности по параметру NPSH должен быть установлен на уровне 2 - 2,5 метра при условии, что перед всасывающей трубой установлено переходное колено (сужающееся). Радиус изгиба колена должен быть, по крайней мере, равен $D1 + 100\text{мм}$, где D1 представляет собой наибольший диаметр колена.

Вопросы, связанные с параметром NPSH, запасами надежности и методикой измерения параметров NPSH, подробно рассматриваются в выпущенном компанией "EUROPUMP" справочнике "NPSH FOR ROTORDINAMIC PUMPS, REFERENCE GUIDE", (1997). (Компания "Евронасос", "Параметры NPSH для роторных насосов, Справочник").