

УДК 532.528

К ВОПРОСУ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ДОПУСКАЕМОГО КАВИТАЦИОННОГО ЗАПАСА НЕФТЯНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ

Ключевые слова: допускаемый кавитационный запас, магистральный насос, переходный процесс, давление.

В статье описан метод снижения допускаемого кавитационного запаса магистрального насосного агрегата (МНА) на основе анализа переходных процессов, возникающих в магистральном трубопроводе, что позволяет оптимизировать настройку системы защит по давлению на входе МНС и тем самым увеличить пропускную способность лимитирующего участка эксплуатируемого магистрального нефтепровода без дополнительного строительства лупингов или проведения других мероприятий, повышающих его пропускную способность.

При проектировании магистральных нефтепроводов (далее по тексту – МН) предполагают, что они работают при установившемся режиме, и, исходя из этого допущения, определяют расчетную пропускную способность, режим работы насосов и другие параметры. Однако в процессе эксплуатации в магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах с промежуточными насосными станциями, работающими по схеме «из насоса в насос», при отключении и включении насосных агрегатов или при внезапном полном отключении одной из промежуточных станций из-за временного прекращения электроснабжения под воздействием различных возмущений потока нефти могут возникнуть переходные процессы, сопровождающиеся колебаниями давления и расхода, которые вызывают срабатывание станционных

защит по давлению. При отключении насоса или насосной станции кроме волн повышенного давления возникает волна пониженного давления, которая со скоростью звука в данной жидкости движется по направлению потока к последующей насосной станции. Волны пониженного давления, распространяясь к последующей насосной станции, могут вызвать на ней кавитацию в насосах, что особенно опасно при перекачке нефтепродукта с высокой упругостью паров из-за образования газовых пузырей в зоне пониженного давления. Поэтому обеспечение необходимого подпора на всасывании магистральных насосов – одно из основных требований для длительной безаварийной работы насосных станций.

В данной работе предлагается метод снижения допускаемого кавитационного запаса магистраль-

Л.М. Беккер
главный технолог
ОАО «Гипротрубопровод»,
г. Москва



И.В. Щербатенко
д.т.н.,
главный специалист
ООО «НИИ ТНН»,
г. Москва



А.С. Иванин
инженер
1-й категории
ОАО «Гипротрубопровод»,
г. Москва



ного насосного агрегата (далее по тексту – МНА) на основе анализа переходных процессов, возникающих в магистральном трубопроводе, что позволяет оптимизировать настройку системы защит по давлению на входе магистральной насосной станции (далее по тексту – МНС) и тем самым увеличить пропускную способность лимитирующего участка эксплуатируемого магистрального нефтепровода без дополнительного строительства лупингов или проведения других мероприятий, повышающих его пропускную способность. Кроме того, на стадии проектирования данный метод позволяет увеличить диапазон расстановки нефтеперекачивающих станций (далее по тексту – НПС) по трассе нефтепровода.

При этом в рамках статьи не рассматривается подробный комплекс мероприятий по увеличению пропускной способности всего нефтепровода (замена рабочих колес МНА, проверка требуемой мощности электродвигателей МНА и т.д.).

Значение допускаемого кавитационного запаса $\Delta h_{\text{доп}}$ связано с паспортным значением критического кавитационного запаса магистрального насоса, полученным при прямо-сдаточном испытании насоса на воде.

Рис. 1.

Эпюра давлений нефти на эксплуатационном участке МН ГНПС № 1 – НПС № 6 при проектной пропускной способности $G=89,7$ млн т/год и $G=91,5$ млн т/год



ОАО «АК «Транснефть» методике [2] коэффициент кавитационного запаса принят $R=1,25$.

Для оценки величины и эффективности снижения коэффициента кавитационного запаса R был рассмотрен эксплуатационный участок ГНПС № 1 – НПС № 6 (оснащенный магистральными насосами НМ 10000-210 с ротором на $12500 \text{ м}^3/\text{ч}$) действующего МН диаметром 1220 мм с пропускной способностью $89,7 \text{ млн т/год}$, перекачивающий нефть с плотностью $861,5 \text{ кг/м}^3$ и кинематической вязкостью 12 сСт (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что участок нефтепровода НПС № 3 – НПС № 4 работает при максимальном давлении на выходе, с равной настройке системы автоматического регулирования давления (далее по тексту – CAP), что свидетельствует о максимальной (предельной) пропускной способности данного участка МН. Таким образом, данный участок является лимитирующим.

Так как режимы работы НПС на МН определяются подачей и напором в данный момент времени и складываются из условий материального и энергетического баланса насосов на НПС и трубопровода, то при последовательном соединении одинаковых насосов на НПС уравнение баланса энергии насосов и лимитирующего участка МН имеет вид

$$h_p = i \cdot l \pm \Delta z + \frac{P_{\text{вх.НПС}}}{\rho \cdot g}, \quad (2)$$

где $h_p = P_p \cdot 10^4 / \rho \cdot g$ – рабочее давление в начале лимитирующего участка МН, м; i – гидравлический уклон МН, м/м; l – длина лимитирующего участка МН, м; Δz – разность геодезических высот конца и начала лимитирующего участка МН, м; ρ – плотность нефти, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Гидравлический уклон МН определяется по формуле

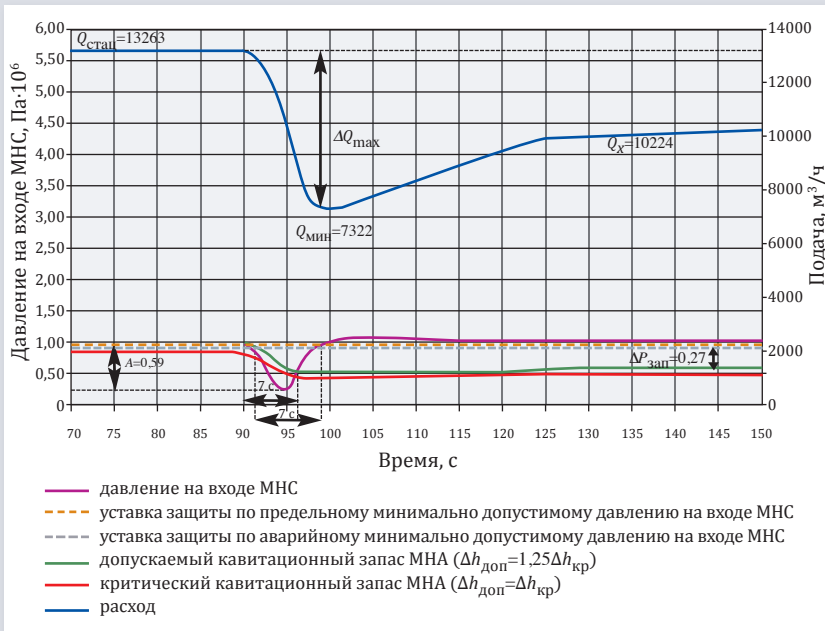
$$i = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; d – внутренний диаметр МН, м; v – скорость жидкости в МН, м/с.

Минимальное давление на входе НПС равно

$$P_{\text{вх. НПС}} = P_{\text{мин.р}} + P_{\text{пот}}, \quad (4)$$

Рис. 2. Изменение во времени параметров потока нефти на входе МНС № 4 и МНА при пропускной способности МН $G=89,7$ млн т/год



$$\Delta h_{\text{доп}} = R \cdot \Delta h_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где $R=1 \div 1,3$ коэффициент кавитационного запаса, зависящий от конструкции насоса, его размеров и условий эксплуатации, в частно-

сти – переходных процессов, возникающих в нефтепроводе при аварийной ситуации (отключении МНА, отключении НПС, закрытии секующих задвижек НПС и др.). В используемой в настоящее время в

где $P_{\text{мин.р}}$ – минимально допустимое рабочее давление на входе магистральной насосной, Па; $P_{\text{пот}}$ – потери давления на трение от точки врезки в магистральный нефтепровод до датчика давления на входе в первый по ходу потока насос, Па.

Согласно [3], минимально допустимое рабочее давление на входе МНС определяется как

$$P_{\text{мин.р}} = \Delta h_{\text{доп}} \cdot \rho \cdot g + P_{\text{п}} - \frac{C_{\text{вх}}^2}{2} \rho + \Delta P_{\text{в.л.}}, \text{ Па}, \quad (5)$$

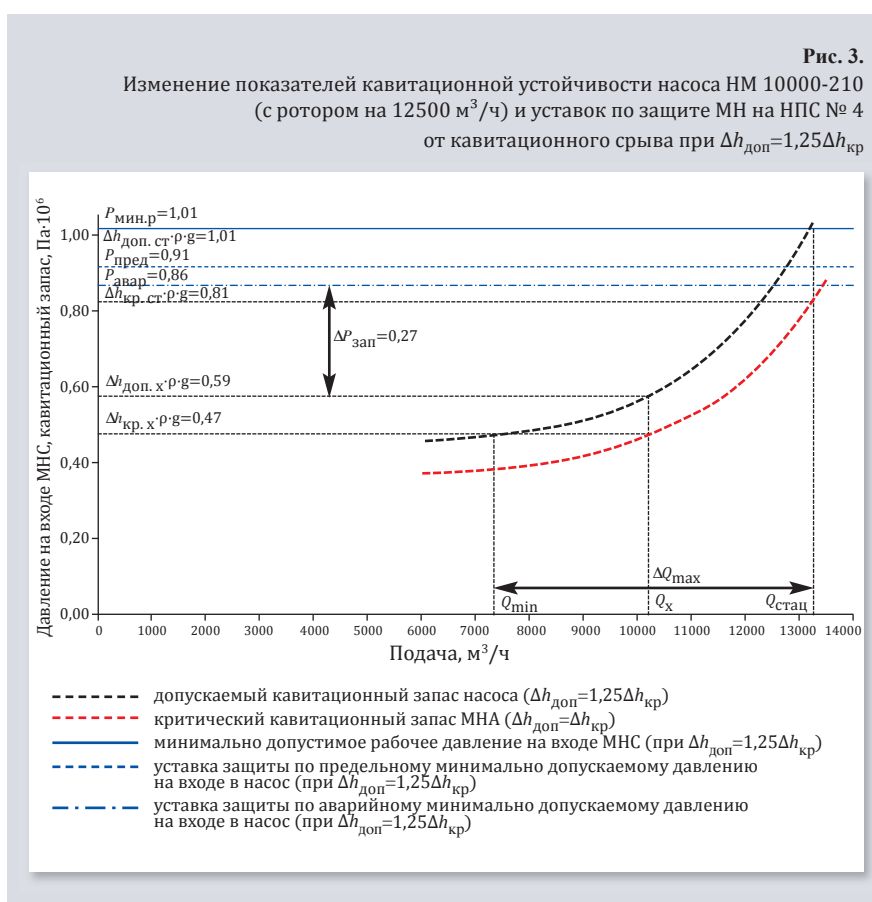
где $P_{\text{п}}$ – давление насыщенных паров нефти, Па; $C_{\text{вх}}$ – скорость жидкости во входном патрубке МНА, м/с; $\Delta P_{\text{в.л.}}$ – гидравлическое сопротивление всасывающей магистрали на участке от места установки датчиков приборов защиты до датчика давления на входе в первый по ходу потока насос, Па.

Таким образом, согласно формуле (5), давление в конце лимитирующего участка $P_{\text{мин.р}}$ на входе промежуточной НПС при прочих равных условиях будет определяться допустимым кавитационным запасом насосного агрегата $\Delta h_{\text{доп}}$. Поэтому, снижая данную величину и увеличивая тем самым гидравлический уклон на лимитирующем участке, можно достичь увеличения его пропускной способности.

В процессе эксплуатации МН, работающего по схеме «из насоса в насос», при отключении и включении различного количества рабочих насосных агрегатов на предыдущей НПС рассматриваемого лимитирующего участка МН возникает переходный процесс, сопровождающийся одновременно волнами разрежения (снижения) давления и снижения расхода, приходящих на последующую НПС участка. Данные условия диктуют повышенные требования к выбору и настройке станционных защит по минимальному давлению на входе МНС с целью исключения их нештатных срабатываний; защиты определяются по формуле согласно [3]

$$P_{\text{уст}} = K \cdot P_{\text{мин.р}} = K \times \left(\Delta h_{\text{доп}} \cdot \rho \cdot g + P_{\text{п}} - \frac{C_{\text{вх}}^2}{2} \rho + \Delta P_{\text{в.л.}} \right), \quad (6)$$

где K – коэффициент настройки датчиков приборов защит (уставка) по предельному ($K=0,90$) и аварий-



ному ($K=0,85$) минимальным давлением на входе в МНС.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что согласно (6) при прочих равных условиях величина настройки системы защиты по давлению на входе МНС будет определяться как

$$P_{\text{уст}} \approx K \cdot \Delta h_{\text{доп}} \cdot \rho \cdot g \approx K \cdot R \cdot \Delta h_{\text{кр}} \cdot \rho \cdot g. \quad (7)$$

Таким образом, при коэффициенте кавитационного запаса $R=1,25$ даже при срабатывании защиты на отключение НПС ($K=0,85$) минимальная величина уставки защиты по аварийному давлению на входе МНС будет на 6,3 % превышать критический кавитационный запас МНА $\Delta h_{\text{кр}}$, что дает возможность для снижения величин уставок защиты по давлению на входе МНС на 6,3 % и тем самым увеличения пропускной способности лимитирующего участка МН (таб. 1).

Так как коэффициент кавитационного запаса R над критическим кавитационным запасом МНА согласно [3] был принят эмпирически из условий эксплуатации МНА, то имеет смысл рассмотреть влияние

переходного процесса на значение данной величины. С этой целью проведем анализ изменения во времени t давления на входе МНС $P_{\text{мин.раб}}$, подачи Q , допустимого $\Delta h_{\text{доп}}$ и критического $\Delta h_{\text{кр}}$ кавитационных запасов первого по ходу потока магистрального насоса, а также правильность выбора уставок защиты МНС по предельному и аварийному минимальным давлениям на входе для значения проектной пропускной способности МН 89,7 млн т/год в результате отключения одного и двух МНА (остановка НПС № 3) на лимитирующем участке НПС № 3 – НПС № 4. Для более детального понимания вопроса сопоставим данные результаты с изменением этих величин в стационарном процессе. При этом случай отключения НПС № 3 является наиболее опасным с точки зрения срабатывания системы защит на НПС № 4 по минимально допустимому давлению на входе МНС. Результаты расчета представлены на рис. 2, 3 и для наглядности в табл. 1. Исходя из графиков на рис. 2, можно сделать вывод, что в переходном процессе при отключении насосных агрегатов на НПС № 3 происходит резкое сни-

Табл. 1.

Параметр	Условное обозначение	Значение (при $\Delta h_{\text{доп}}=1,25\Delta h_{\text{кр}}$)	Величина запаса над критическим кавитационным запасом МНА, %	
			при стационарном режиме ($\Delta h_{\text{кр}}=0,81$ МПа)	в переходном процессе ($\Delta h_{\text{кр}}=0,47$ МПа)
Минимальное рабочее давление на входе МНС, МПа	$P_{\text{мин.р}}$	1,01	25,0	114,0
Величина уставки по предельному минимальному давлению на входе МНС, МПа	$P_{\text{уст}}=0,90 \cdot P_{\text{мин.р}}$	0,91	12,5	93,6
Величина уставки по предельному аварийному давлению на входе МНС, МПа	$P_{\text{уст}}=0,85 \cdot P_{\text{мин.р}}$	0,86	6,3	83,0

Табл. 2.

Параметр	Условное обозначение	Значение (при $\Delta h_{\text{доп}}= \Delta h_{\text{кр}}$)	Величина запаса над критическим кавитационным запасом МНА в переходном процессе, % ($\Delta h_{\text{кр}}=0,47$ МПа)
Минимальное рабочее давление на входе МНС, МПа	$P_{\text{мин.р}}$	0,81	72,4
Величина уставки по предельному минимальному давлению на входе МНС, МПа	$P_{\text{уст}}=0,90 \cdot P_{\text{мин.р}}$	0,74	57,5
Величина уставки по предельному аварийному давлению на входе МНС, МПа	$P_{\text{уст}}=0,85 \cdot P_{\text{мин.р}}$	0,70	49,0

жение (провал) давления, расхода и величины кавитационного запаса МНА во времени, после чего происходит восстановление данных параметров до значений нового установившегося режима перекачки. При этом согласно рис. 3, на котором представлена паспортная кавитационная характеристика МНА, при изменении расхода происходит изменение кавитационного запаса МНА. Поэтому в нашем случае при отключении НПС № 3 и выходе на новый установившийся режим (подачу) расчетного участка допустимый кавитационный запас МНА (рис. 3, точка Q_x) не только не превышает значения уставок защит МНС по предельному и аварийному минимальным давлениям, но и имеет достаточно большой запас над ними в переходном процессе по сравнению со стационарным режимом (табл. 1) за счет того, что производительность нового установившегося режима гораздо ниже проектной.

Что же касается непосредственно переходного процесса, то при данном характере возмущения (перехода МН с одного режима работы на другой при отключении

НПС № 3) согласно рис. 2 продолжительность работы магистрального насоса с кавитационным запасом ниже $\Delta h_{\text{доп}}=1,25\Delta h_{\text{кр}}$ и, соответственно, давлением на входе МНС ниже величин уставок защиты МНС составляет 7 с, что не превышает значения времени $\tau=20$ с, регламентируемого [3] и не приводит к срабатыванию системы защиты.

Опираясь на результаты проведенного анализа, можно сделать вывод, что на лимитирующем участке НПС № 3 – НПС № 4 при переходном процессе (отключение МНА на НПС № 3) не происходит срабатывание системы защиты на НПС № 4 по минимально допустимому давлению на входе МНС и по факту имеется существенный запас (до 83 %) величины настройки системы защиты над критическим кавитационным запасом МНА (если рассматривать изменение этих величин только при стационарном режиме перекачки). Это дает возможность для проектного режима перекачки ($G=89,7$ млн т/год) снизить величины уставок защит на НПС № 4 по минимально допустимому давлению на входе МНС за

счет снижения коэффициента кавитационного запаса R (7); тем самым при неизменном давлении на выходе НПС № 3 увеличить пропускную способность лимитирующего участка НПС № 3 – НПС № 4.

Результаты гидравлических расчетов по определению величины снижения коэффициента кавитационного запаса R , согласно вышеописанной методике, представлены на рис. 4, 5 и для наглядности – в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что для лимитирующего участка НПС № 3 – НПС № 4 возможно снижение коэффициента кавитационного запаса $R=1,25$ до величины $R=1,0$, что позволило снизить минимально допустимое давление на входе МНС и принять более низкие величины уставок защит на НПС № 4 по минимально допустимому рабочему давлению на входе МНС, а также увеличить пропускную способность лимитирующего участка НПС № 3 – НПС № 4 с $G=89,7$ млн т/год до $G=91,5$ млн т/год (рис. 1), т.е. на 1,8 млн т/год. В результате отключения НПС № 3 и выхода на новый установившийся режим

(подачу) расчетного участка, допустимый кавитационный запас МНА равный критическому (рис. 5, точка Q_x), также не превышает значения уставок защит МНС по предельному и аварийному минимальным давлениям в переходном процессе. При этом, согласно рис. 4, продолжительность работы магистрального насоса с давлением на входе МНС ниже величин уставок защиты МНС составляет 8 с, что не превышает значения времени $\tau=20$ с, регламентируемого [3] и также не приводит к срабатыванию системы защиты.

Согласно табл. 2, при снижении коэффициента кавитационного запаса R до величины $R=1,0$ по факту в переходном режиме также имеется существенный запас (до 49 %) величины настройки системы защиты МНС над критическим кавитационным запасом МНА.

Таким образом, из анализа результатов гидравлического расчета эксплуатационного участка МН при отключении одной из промежуточных МНС можно сделать вывод, что предложенный метод позволяет расчетно на основе анализа переходных процессов обосновать снижение коэффициента кавитационного запаса с $R=1,25$ до $R=1,0$, что дает возможность снизить величины уставок защиты по минимально допустимому рабочему давлению на входе МНС (7) на лимитирующем участке эксплуатируемого нефтепровода и тем самым увеличить его пропускную способность. В общем случае обоснование значения коэффициента кавитационного запаса R в условиях переходного процесса на рассматриваемой НПС должно проводиться для всех возможных режимов перекачки при отключении одного, двух и трех рабочих МНА.

Аналогично указанному выше необходимо определять значение коэффициента запаса R и для остальных участков нефтепровода с целью уточнения гидравлического расчета.

Ввиду того что полуэмпирическая методика расчета критического кавитационного запаса насоса [2] была получена с использованием результатов кавитационных испытаний магистральных насосов на холодной

Рис. 4.

Изменение во времени параметров потока нефти на входе в МНС № 4 и МНА при пропускной способности МН $G=91,5$ млн т/год

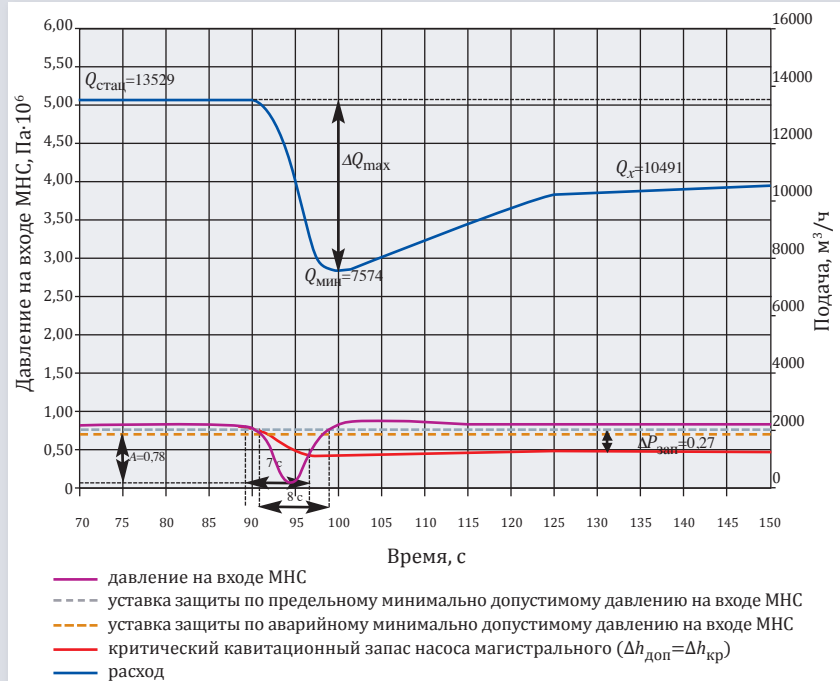
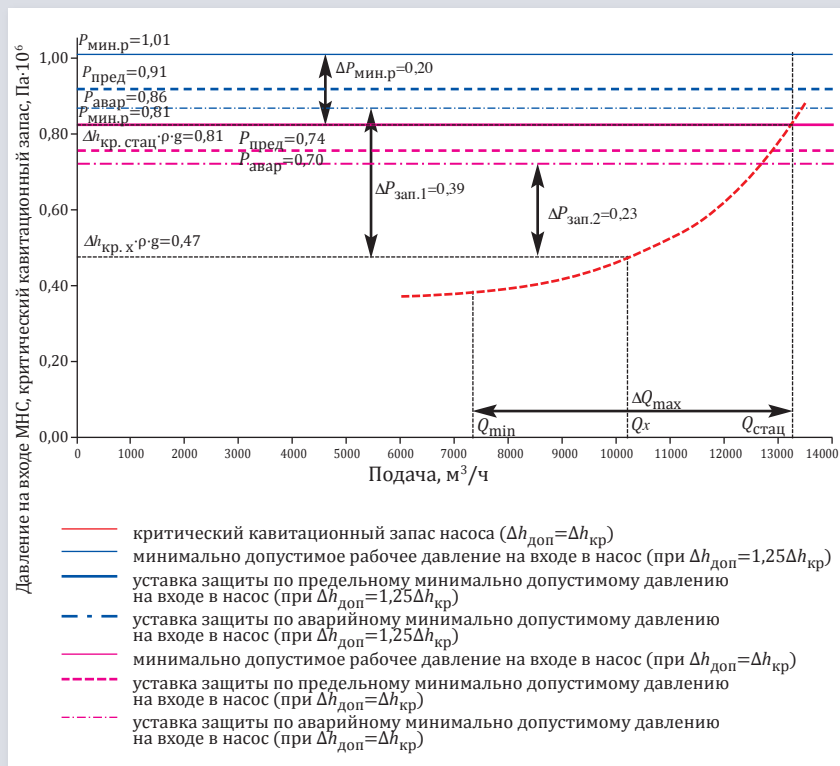


Рис. 5.

Изменение показателей кавитационной устойчивости МНА НМ 10000-210 (с ротором на 12500 м³/ч) и уставок по защите МН на НПС № 4 от кавитационного срыва МНА при $\Delta h_{доп}=\Delta h_{кр}$



воде в составе заводского испытательного стенда, точность определения величины $\Delta h_{кр}$ с помощью этой методики связана со значительной погрешностью при пересчете кавитационной характеристики МНА холодной воды на нефть. При этом данная погрешность начинает оказывать существенное влияние на величины уставок системы защит МНС при снижении допускаемого кавитационного запаса МНА до критического значения, так как при снижении коэффициента кавитационного запаса $R=1,25$ до $R=1,0$ отсутствует запас, нивелирующий данную погрешность. В связи с этим предлагается экспериментальный метод определения наличия кавитации в МНА на эксплуатируемой НПС, например, на НПС № 4. Натурные кавитационные испытания проводятся в два этапа:

1) на входе первого по ходу потока МНА установить при данной подаче с использованием регулятора давления на предыдущей НПС расчетное значение критического давления на входе $P_{вх.кр}$ и по измеренным значениям входного и выходного давлений определить напор насоса;

2) данный МНА подключается вторым по ходу потока, и при той же подаче по аналогии с первым этапом определяется его напор.

Установка насоса вторым по ходу потока полностью исключает кавитационные явления в его проточной части.

Сопоставление напоров МНА на первом и втором этапах проверки позволяет экспериментально подтвердить или опровергнуть наличие критического кавитационного режима работы насоса (соответствует трехпроцентному падению напора) на первом этапе проверки.

Совпадение значений дифференциальных напоров данных МНА на обоих этапах проверки означает, что при $P_{вх.кр}$ скрытая кавитация в его проточной части, если она имеет место, никак не отражается на его напоре, а значит, и на режиме работы МНА.

В противном случае измеренная величина напора насоса на первом этапе проверки определяет степень развития кавитации в его проточной части при $\Delta h \geq \Delta h_{кр}$.

Выводы:

1. Предложенный расчетный метод обосновывает на основе анализа переходных процессов возможность снижения коэффициента кавитационного запаса R и, как следствие, – позволяет существенно уменьшить допускаемый кавитационный запас магистрального насоса вплоть до критического значения, позволяя при этом оптимизировать настройку системы защит по давлению на входе МНС для всех возможных технологических режимов на рассматриваемом участке нефтепровода, не приводя к ее срабатыванию. Снижение уставок системы защит по минимально допустимому рабочему давлению на входе МНС, в свою очередь, позволяет повысить пропускную способность лимитирующего участка рассматриваемого эксплуатируемого нефтепровода либо увеличить расстояние между проектируемыми НПС при их расстановке.

2. Для обеспечения более точного определения критического кавитационного запаса насосного агрегата на нефти по сравнению с полуэмпирической методикой [2] авторами был предложен экспериментальный метод определения наличия кавитации в первом по ходу потока нефти насосе в условиях эксплуатации для любого технологического режима перекачки без необходимости остановки МНС и проведения стендовых испытаний данного МНА. При этом указанный метод позволяет определить наличие кавитации именно для нефтей того состава, который транспортируется по рассматриваемому нефтепроводу, и устраняет необходимость пересчета паспортных кавитационных характеристик МНА с холодной воды на нефть. Последнее позволяет повысить точность и оптимальность настройки системы защиты НПС по минимально допустимому рабочему давлению на входе МНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 6134-2007 (ИСО 9906:1999). Насосы динамические. Методы испытаний.
2. РД-23.080.00-КТН-064-10. Методика расчета уставок по минимальному давлению на входе НПС.
3. РД-35.240.00-КТН-207-08. Автоматизация и телемеханизация магистральных нефтепроводов. Основные положения.

