

Методика непрерывного получения характеристик лопастного насоса для переменной температуры и вязкости рабочей жидкости при испытаниях в термобарокамере

10, октябрь 2016

к.т.н., доцент Петров А. И.^{1,*}

УДК: 62-932

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}alex_i_petrov@mail.ru

Введение

В современной технике используется достаточно большое количество лопастных насосов, работающих в широком диапазоне вязкостей рабочих жидкостей. Это, в частности, нефтяные насосы, далее, насосы, применяемые в пищевой промышленности, насосы систем термостабилизации, и ряд других насосов. Соответственно, методики пересчета характеристик насосов на различные величины вязкости перекачиваемой среды разработаны достаточно давно (в первую очередь применительно к нефтяным насосам) [1, 2, 6, 8]. Однако существующие методики, как правило, разработаны для лопастных насосов средней и высокой быстроходности (поскольку именно такие насосы наиболее целесообразно применять для перекачивания высоковязких сред), а вязкость жидкости обычно не превышает 300..400 сСт, что в некоторых источниках [1, 4] считается предельными значениями для лопастных насосов.

Несколько особняком в этом плане стоят насосы систем термостабилизации различной аппаратуры. Особенность условий работы таких насосов в том, что рабочей жидкостью таких систем часто являются водные растворы этиленгликоля, т.е. антифризы, а рабочим диапазоном температур – от минус 50 до плюс 50 градусов Цельсия. Кроме того, для таких циркуляционных систем характерны относительно высокие потребные напоры насосов при низкой их подаче, что приводит к необходимости применения насосов низкой быстроходности (особенно в случае, когда ограничение на осевые габариты насосов не позволяет применять многоступенчатые их компоновки).

Для антифризов типа ОЖ-40 и ОЖ-65 характерны высокие вязкости при низких температурах жидкости. На рисунке 1 приведен пример зависимости вязкости антифризов от температуры, из которой видно, что при температуре минус 50 градусов Цельсия вязкость ОЖ-65 достигает 800 сСт, а при минус 55 – до 1200 сСт.

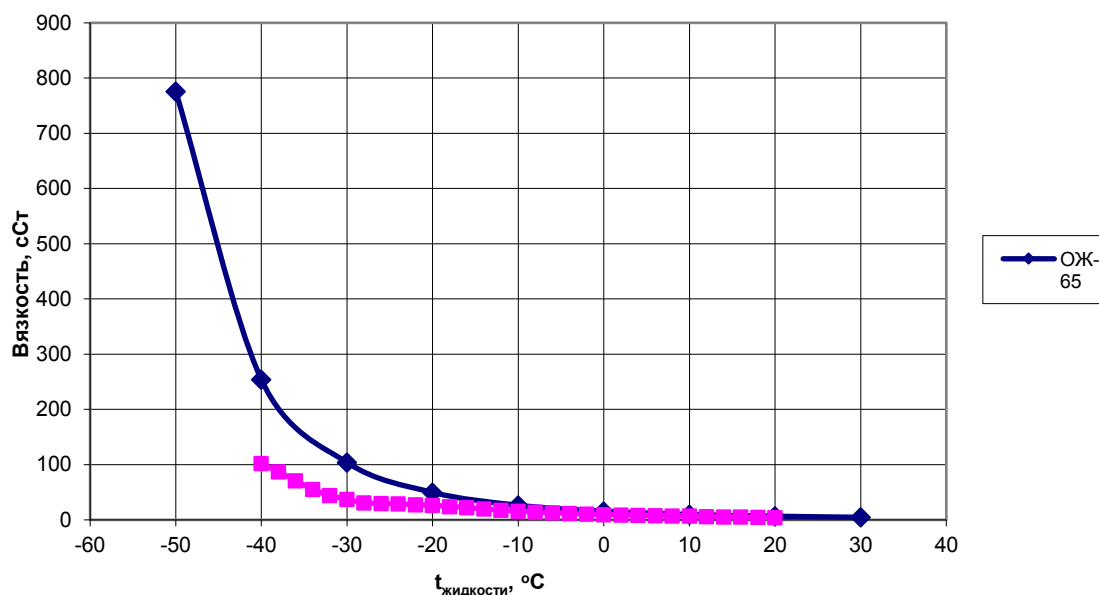


Рис.1. Зависимость вязкости этиленгликолевых антифризов от температуры

Соответственно, появляется необходимость испытаний насосов систем термостабилизации в широком диапазоне вязкостей рабочей жидкости с последующим обобщением характеристик по вязкости и числам Рейнольдса [6].

Постановка задачи

Основным критерием подобия при испытаниях лопастных насосов на высоковязкой рабочей жидкости является число Рейнольдса, которое для лопастного насоса записывается так [6]:

$$Re = \frac{\omega R_2^2}{\nu},$$

где ω – угловая скорость вращения рабочего колеса, 1/с;

R_2 – радиус колеса на выходе из него по средней струйке, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Сложность поставленной экспериментальной задачи заключается в том, что для циркуляции высоковязкой жидкости в стенде характерно высокое тепловыделение вследствие гидравлических потерь как в насосе, так и элементах конструкции стенда. Это тепловыделение зависит как от режима работы насоса в стенде, так и от собственно вязкости жидкости. Соответственно, очень сложно поддерживать постоянной вязкость жидкости даже в процессе снятия одной характеристики, с учетом общего градиента изменения температуры в сторону повышения.

При этом значительная крутизна вязкостной характеристики жидкости (рис.1, ОЖ-65) приводит к существенному изменению вязкости даже при малом отклонении температуры. Из литературы [2, 9], работ ВНИИ Гидромаша и личного опыта автора известны сле-

дующие методы снятия характеристик лопастных насосов на рабочей жидкости высокой вязкости:

1. Схема стенда с включенной в основной контур автономной холодильной машиной с управлением обратной связью по температуре жидкости (рис. 2).

Преимуществом такого стенда является высокая точность поддержания температуры в стенде с помощью автономной холодильной машины (АХМ). Однако при низких температурах жидкости требуется очень хорошая термоизоляция стенда и АХМ избыточно большой мощностью. Как следствие, такой стенд хорошо подходит для длительных (например, ресурсных) испытаний насосов при не очень низкой температуре рабочей жидкости. Но высокая стоимость и сложность стенда, а также ограниченная мощность холодильной машины не позволяет обычно использовать такую схему для температур рабочей жидкости ниже минус 10..15 градусов Цельсия.

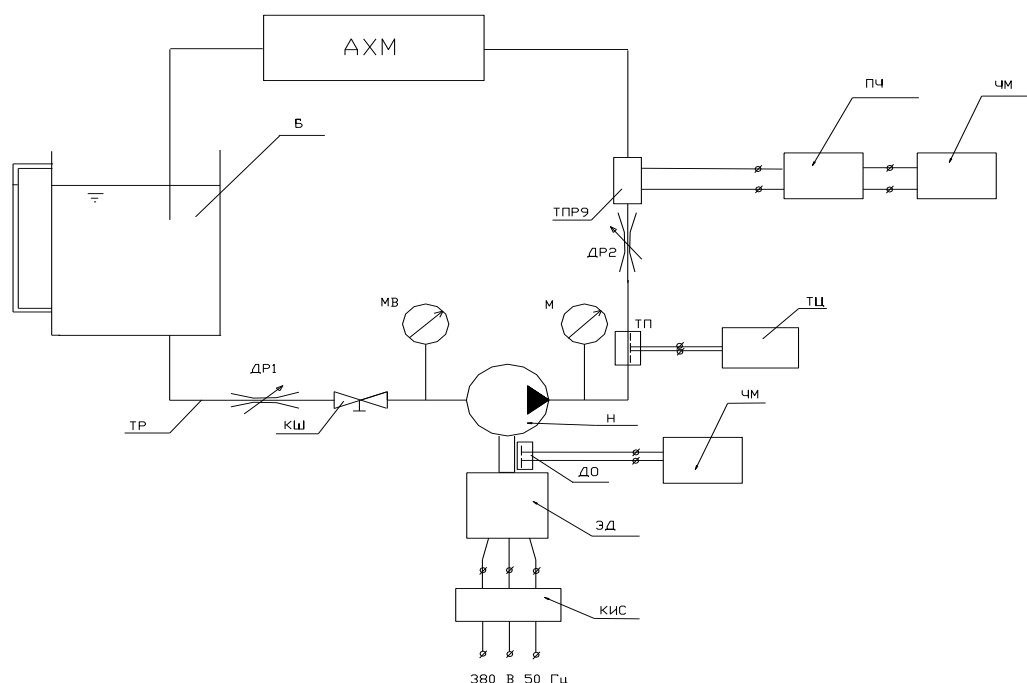


Рис. 2. Схема стенда для ресурсных испытаний насосов на рабочей жидкости ОЖ-40 при стабилизированной температуре рабочей жидкости

2. Схема стенда на высоковязкой рабочей жидкости (рис. 3).

Основная идея такого стенда заключается в использовании рабочей жидкости с вязкостью намного более высокой, чем у штатных рабочих жидкостей, и с примерно равной им плотностью. Примером таких жидкостей могут служить масла типа И-50, вязкость которых при плюс 18..20 градусов Цельсия составляет около 700 сСт, или водные-глицериновые растворы с малым содержанием воды.

Преимуществом такого стенда является отсутствие необходимости в термоизоляции и возможности проведение испытаний при нормальных температурах. Однако необходимость в теплообменнике остается, т.к. тепловыделение также значительно. Причем полу-

The diagram illustrates a heating system layout. At the top, a boiler (Б) is connected to a network of pipes. A supply line (Т0) leads to a three-way valve (ДР) that can direct flow to either a radiator (ТЦ) or a pump (МВ). The return line from the radiator passes through a pump (М) and a valve (КШ) before returning to the boiler. A separate branch from the main supply line goes through a pump (МВ) and a valve (КШ) to a radiator (ТЦ). The return line from this radiator also passes through a pump (М) and a valve (КШ) before returning to the boiler. The system is powered by a transformer (ТД) connected to a power source (КИС). The diagram also shows a control unit (ПЧ) and a sensor (ЧМ) connected to the system.

3. Стенд, смонтированный в термобарокамере (рис. 4).

Как следствие, температура жидкости постоянно «ползла» вверх в процессе испытаний в зависимости от режима работы насоса (от которого зависит величина тепловыделения в стенде) и времени с момента начала испытаний.

11

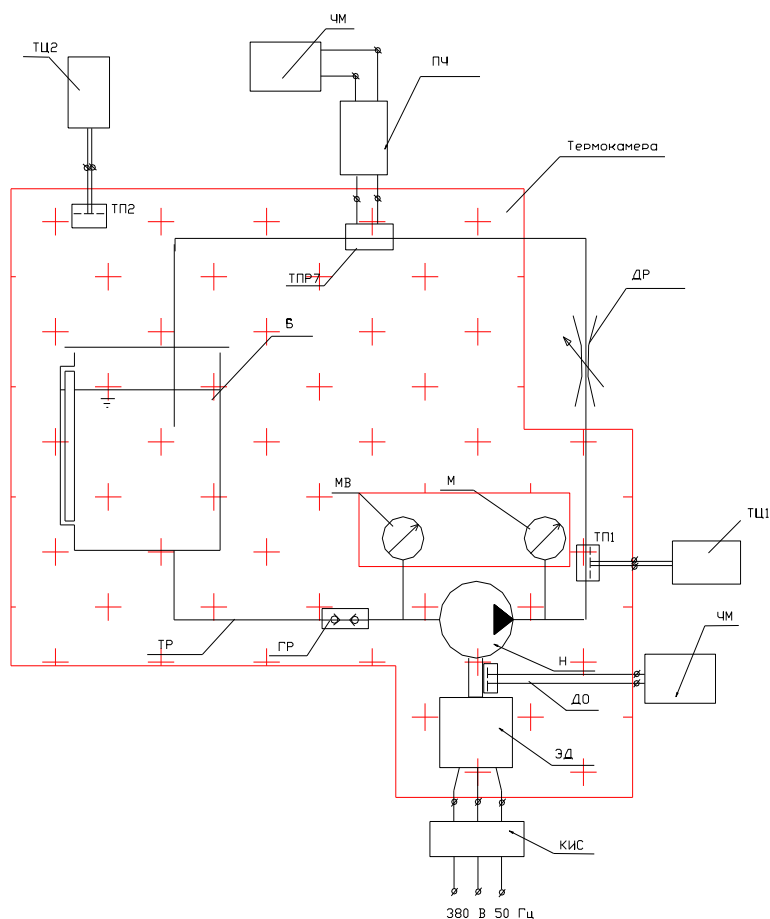


Рис. 4. Схема стенда для испытаний насосов в термобарокамере при низких температурах окружающей среды и рабочей жидкости

Метод непрерывного испытания насосов в термобарокамере

После ряда неудачных попыток добиться стабильной температуры рабочей жидкости в термобарокамере в процессе испытаний (возможно, это удалось бы сделать при дополнении термобарокамеры внешней холодильной низкотемпературной машиной, но такая схема стенда слишком сложна) был разработан следующий метод снятия характеристик насоса:

1. Первоначально термобарокамера выводится на минимальную требуемую температуру среды (минус 50..55 градусов Цельсия), и стенд выдерживается при ней несколько часов при неработающем насосе, чтобы добиться равномерного охлаждения всех его элементов;
2. Затем включается насос, и при камере, работающей на максимальную мощность охлаждения, начинается снятие параметров насоса с постепенным уменьшением его подачи от максимальной до минимума. При этом температура жидкости, измеряемая термопарой, установленной в стенде перед насосом, также измеряется в каждой точке;
3. Далее снятие точек продолжается в течение нескольких часов при непрерывно меняющейся температуре рабочей жидкости. После того, как температура повысится до минус 1 градуса Цельсия, что делает дальнейшее снятие параметров нецелесо-

образным, стенд отключается, и камера снова приводится в течение нескольких часов в состояние термодинамического равновесия при температуре минус 50..55 градусов.

4. Затем испытания повторяются, начиная с п.1. Общий массив точек, соответствующих как разным режимам работы насоса, так и разным температурам рабочей жидкости, приводится к зависимостям вида:

$$\bar{H} = f(Q) \text{ при } t_{\text{рж}} = t_i \pm 2^\circ\text{C},$$

где $\bar{H} = \frac{H}{D_2^2 n^2}$ - безразмерный напор насоса;

Q – подача насоса, м³/с (также может быть выражена в безразмерной форме, но в практических целях удобнее сравнивать для одного и того же насоса зависимости безразмерного напора от размерной подачи);

$t_{\text{рж}}$ – температура рабочей жидкости в стенде, °С;

t_i – температура, при которой определяется одна конкретная характеристика, соответствующая малому (в пределах отклонения $\pm 2^\circ\text{C}$) изменению вязкости рабочей жидкости, °С.

Причем при увеличении числа снимаемых точек можно повысить точность определения вязкости для каждой характеристики, сузив данный диапазон допуска по температуре жидкости.

Аналогичные зависимости могут быть построены и для мощности, потребляемой насосом, а также для КПД насоса.

Пример построения такого семейства характеристик (для диапазона температур минус 1..минус 40 градусов Цельсия) показан на рисунке 5. В данном случае для построения сводной характеристики понадобилось около 300..350 замеров.

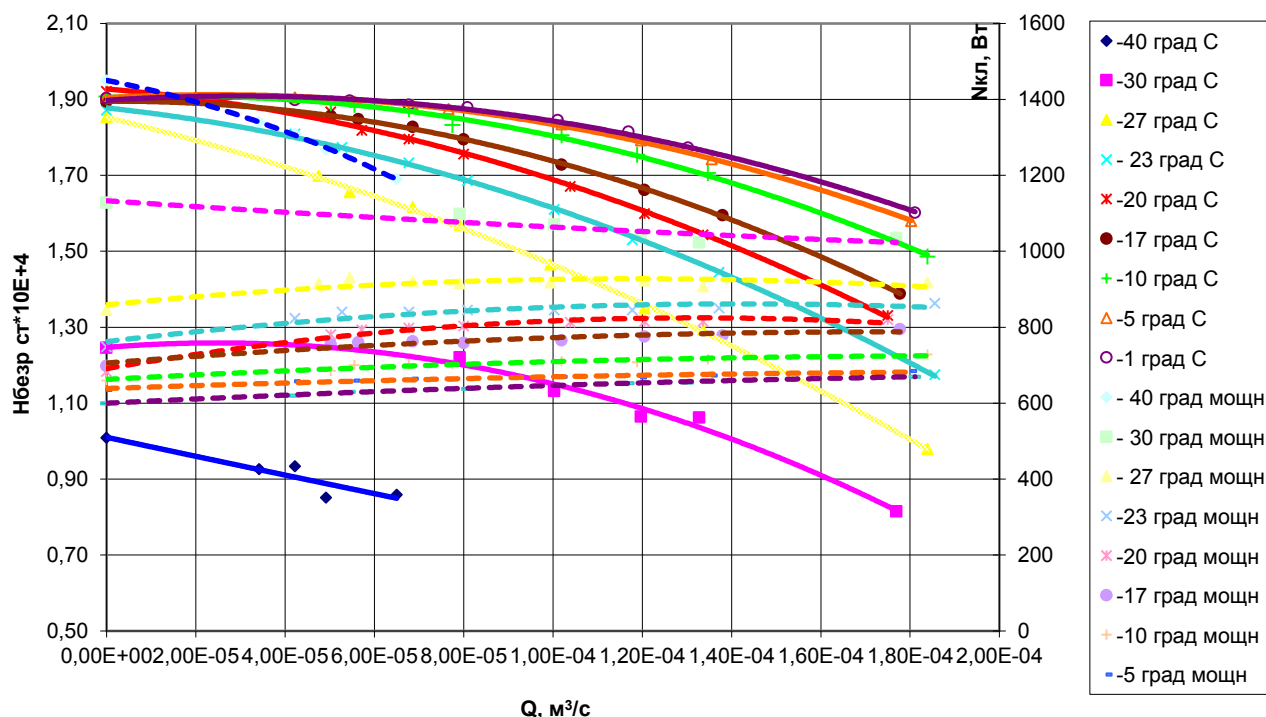


Рис. 5. Зависимости безразмерного напора $\bar{H}$ и мощности от подачи насоса и температуры рабочей жидкости

По результатам испытаний, проведенных по данной методике, может быть построена безразмерная характеристика насоса в виде зависимости относительного коэффициента напора (отношение безразмерного напора на вязкой жидкости к такому же на воде для оптимального режима работы насоса) от числа Рейнольдса. Относительный коэффициент напора определяется [6] как

$$K_H = \frac{\bar{H}_{рж}}{\bar{H}_{вод}}$$

Пример такой характеристики приведен на рисунке 6. В данном случае сравнение со сводной диаграммой Степанова показало существенное падение напора в области малых чисел Рейнольдса (при увеличении вязкости), что было исправлено коррекцией геометрии проточной части.

Дальнейшее совершенствование проточных частей насоса низкой быстроходности, работающих на высоковязких жидкостях (в частности, в системах жидкостного охлаждения радиоэлектронных приборов) может быть достигнуто путем комплексного гидродинамического моделирования их рабочего процесса с учетом изменения вязкости жидкости [3, 7], однако необходимость проведения испытаний, натурных или модельных, все равно остается.

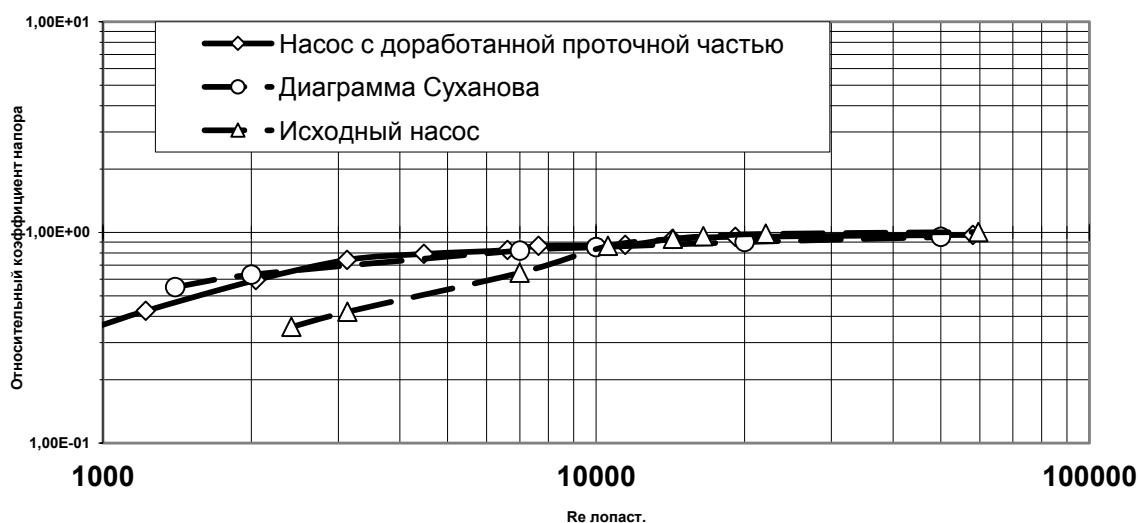


Рис. 6. Итоговые зависимости относительного безразмерного напора насоса от числа Рейнольдса

Заключение

Предложенная методика получения характеристик насоса в широком диапазоне вязкости рабочей жидкости позволяет проводить такие испытания без использования сложных автоматических систем термостабилизации стенда в обычной термобарокамере.

Возможно также применение данной методики для испытаний на высоковязких жидкостях при нормальной температуре окружающей среды.

Список литературы

- [1]. Айзенштейн М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности. М.: Гос-топтехиздат. 1957. 363 с.
- [2]. ГОСТ 6134-2007. Насосы динамические. Методы испытаний. Введ. 2008-05-31. Измен. 2016-10-18. М.: Стандартиформ. 2008. 96 с.
- [3]. Ломакин В.О., Чабурко П.С. Влияние закрутки потока на гидравлический КПД насоса // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. Режим доступа: <http://engsi.ru/doc/820781.html> (дата обращения: 1.10.2016)
- [4]. Зимницкий В.А., Каплун А.В., Папир А.Н., Умов В.А. Лопастные насосы. Справочник / Под общ. ред. В.А. Зимницкого, В.А. Умова. Л.: Машиностроение. 1986. 334 с.
- [5]. Петров А.И. Системы поддержания теплового баланса в современных стендах для испытаний лопастных насосов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. №5. С. 33–44. DOI: 10.7463/aplts.0515.0820499. Режим доступа: <http://maplantsjournal.ru/doc/820499.html> (дата обращения: 1.10.2016)
- [6]. Суханов Д.Я. Работа лопастных насосов на вязких жидкостях. М.: Машгиз. 1952. 35 с.
- [7]. Чабурко П.С., Ломакин В.О., Кулешова М.С., Баулин М.Н. Комплексная оптимизация проточной части герметичного насоса методом ЛП-Тау поиска // Насосы. Турбины. Системы. 2016. № 1 (18). С. 55-61.
- [8]. Юнусова М. Ю., Стюфляев С. С. Проектирование гидравлического стенда для натурных испытаний высокотемпературного судового насоса // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. №8. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/793019.html> (дата обращения: 1.10.2016)
- [9]. Яременко О.В. Испытания насосов. Справочное пособие. М.: Машиностроение. 1976. 225 с.