

УДК 621.689

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПУСКА В РАБОТУ
МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОГРУЖНОГО НАСОСА В
УСЛОВИЯХ ОТГРУЗКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ
КРУПНОТОННАЖНЫХ ХРАНИЛИЩ**

Давыденко М.И. (Национальный исследовательский университет ИТМО)

Научный руководитель – д.т.н, профессор Баранов А.Ю.

(Национальный исследовательский университет ИТМО)

Аннотация. Данная работа представляет собой математическое описание процесса пуска в работу модернизированной конструкции погружного насоса системы отгрузки сжиженного природного газа (далее – СПГ) из крупнотоннажных хранилищ. В ходе работы получены системы математических уравнений, описывающие изменение угловых скоростей вращения рабочих колес привода и насоса в процессе запуска системы. В заключении рассмотрены режимы запуска агрегата для двух вариантов открытия запорного регулирующего органа на подающем СПГ трубопроводе.

Введение. В целях повышения энергоэффективности системы отгрузки СПГ из крупнотоннажных хранилищ в предыдущих исследованиях был предложен вариант модернизации конструкции погружного насоса СПГ (далее – ПНСПГ). В качестве метода модернизации была принята замена электрического привода, используемого в 95% действующих системах отгрузки СПГ, на привод от гидротурбины, использующий в качестве рабочей жидкости производимый СПГ и работающий за счет его потенциальной энергии. Исключение из конструкции ПНСПГ электропривода ведет за собой значительное снижение эксплуатационных издержек, повышает ремонтпригодность и надежность системы отгрузки в целом. Кроме того, использование гидротурбины, работающей на производимом СПГ, в качестве привода центробежного насоса отгрузки способствует повышению рентабельности и снижению энергопотребления системы.

В данной работе проведено математическое моделирование процесса пуска в работу модернизированной конструкции ПНСПГ на основании ранее полученных результатов расчета операционных параметров работы агрегата. Задачей исследования является получение систем математических уравнений, описывающих запуск агрегата в работу в различных условиях открытия запорного регулирующего органа на подающем СПГ трубопроводе.

Основная часть. Модернизированная конструкция ПНСПГ представляет собой соосно установленные рабочие колеса гидротурбины и центробежного насоса. До гидротурбины СПГ находится в недогретом состоянии и его свойства сходны со свойствами любой традиционной жидкости. Часть потока направляется на гидротурбину, где энергия потока преобразуется в энергию вращения рабочего колеса турбины и затрачивается на вращение рабочего колеса насоса. Использование СПГ в качестве источника механической энергии значительно упрощает конструкцию ПНСПГ. Устраняются проблемы уплотнения подшипников, так как переток жидкости из турбины в рабочее колесо не влияет на производительность насоса.

Основным уравнением, используемым для расчета процесса запуска в работу агрегата, является дифференциальное уравнение момента. Для получения системы математических уравнений дифференциальное уравнение моментов было расписано для турбины и насоса в отдельности, после чего уравнения были сведены в равенство путем пересчета через КПД.

В ходе исследования было получено уравнение, описывающее процесс изменения скорости вращения гидрогенератора турбины при изменении нагрузки на гидротурбину. Данное уравнение использовалось для получения уравнения определяющего процесс изменения угловой скорости на валу со стороны насоса, от нагрузки на гидротурбине. Оба итоговых уравнения представляют собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка,

решение которого представляет собой решение задач Коши при заданном начальном условии.

Полученные неоднородные дифференциальные уравнения решались для двух условий запуска агрегата в работу:

- при условии постоянства степени открытия затвора вентиля на подающем трубопроводе СПГ. Такой вариант также можно рассмотреть для варианта, когда периодом открытия запорного устройства можно пренебречь и считать, что открытие происходит за бесконечно малый момент времени;
- при условии постепенно увеличивающейся степени открытия затвора вентиля на подающем трубопроводе СПГ.

Для обоих режимов для расчетов шаг по времени был принят равным 1 секунде. Для первого режима открытия запорного органа в качестве номинального (постоянного) значения степени открытия сечения в первом приближении принято значение 0,75, при максимальном значении 1,0.

Из полученных данных для режима работы с постоянной степенью открытия запорного устройства (непрерывный характер работы отгрузочной системы) установившаяся угловая скорость вращения вала турбины составляет 3240,64 об/мин, установившаяся угловая скорость вращения вала насоса составляет 2994,92 об/мин. Полученные значения соответствуют допустимым режимам работы для выбранных агрегатах в заданных условиях работы. Кроме того, стоит отметить, что стабилизация частот вращения наступает на 30-35 секунде работы агрегата. Быстрая стабилизация вращения способствует снижению вероятности возникновения кавитационных явления на лопастях гидротурбины и насоса, а также быстрому выходу на оптимальные режимы выдачи СПГ из резервуара хранения.

Для второго режима работы агрегата считается, что открытие регулирующего органа происходит постепенно, с определенным шагом по времени. За счет постепенного изменения степени открытия набор угловой скорости вращения гидрогенератора также происходит медленнее, чем в первом случае. В первом приближении было принято, что степень открытия увеличивается на 0,05 в каждый период шага времени.

Для второго режима работы в сравнении с первым режимом набор скорости происходит по более крутой кривой, чем в первом режиме работы. В первую очередь это связано с шагом изменения степени открытия проходного сечения. Чем меньше задан шаг открытия, тем более плавно и полого будет происходить набор скорости агрегата. На 15 секунде работы степень открытия достигает номинального значения и далее характер изменения скоростей переходит в очень плавный практически неизменных.

После установившего значения степени открытия проходного сечения, установившаяся угловая скорость вращения вала турбины составляет 3240,64 об/мин, установившаяся угловая скорость вращения вала насоса составляет 2994,92 об/мин. Полученные значения соответствуют допустимым режимам работы для выбранных агрегатах в заданных условиях работы. Установившийся процесс работы наблюдается на 35-40 секунде работы агрегата.

Выводы. В результате работы были получены системы уравнения, описывающие процесс запуска в работу модернизированной конструкции ПНСПГ для различных режимов открытия запорного органа на подающем СПГ трубопроводе. Была проведена верификация полученной математической модели и определен временной интервал выхода на номинальные частоты вращения. Полученные результаты удовлетворяют операционным требованиям к работе агрегата в системах отгрузки СПГ из крупнотоннажных хранилищ.

Давыденко М.И. (автор) _____

Баранов А.Ю. (научный руководитель) _____