

УДК 621.67  
УДК 629.123.56.06

## ОЦЕНКА УРОВНЯ КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРОВ ГРУЗОВЫХ СИСТЕМ НЕФТЯНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Маценко С.В.

Казунин Д.В.

Современный береговой терминал для обработки нефтепродуктов представляет собой многофункциональный комплекс, состоящий из десятков емкостей, соединенных трубопроводами общей длиной несколько сотен километров. Грузовые операции производятся диспетчерами (Cargo Master), задача которых заключается в одновременном управлении сдачей и приемом груза с нескольких танкеров, подготовкой резервуарного парка к технологическим и грузовым операциям. Ошибка или неправильное действие оператора может привести к серьезной аварии, которая может стать причиной экологической катастрофы регионального масштаба.



**Рис.1. Пример панели управления системами тренажера нефтяного терминала**

Обучение диспетчеров грузовых систем нефтяных терминалов производится на специализированном компьютерном тренажерном оборудовании, которое имитирует экранные консоли управления (рис.1) и описывает поведение оборудования с помощью математических моделей [1], построенных на базе характеристик оборудования и механизмов.

В настоящее время оценка квалификации обучающихся производится на основании субъективного мнения инструктора, которое формируется в ходе выполнения упражнения. Во время занятия инструктор следит за

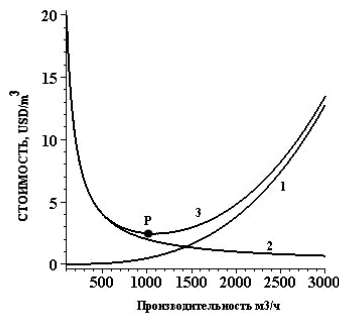
правильностью действий обучаемого и корректирует их в случае необходимости, а сам тренажер снабжен функцией автоматического прерывания упражнения в случае серьезных поломок или нарушений правил эксплуатации. В конце занятий в случае успешного завершения упражнения диспетчеру выставляется оценка в зависимости от количества допущенных ошибок, установленного инструктором лимита времени и с учетом того, была ли аварийная ситуация автоматически прервана самим тренажером.

В последнее время заказчики тренажерного оборудования в ряде стран Южноазиатско-тихоокеанского региона внесли предложение внедрить в их средства обучения диспетчеров методику объективной оценки компетентности, как студентов, так и уже работающих в отрасли специалистов. Существующая система оценки непригодна для выполнения таких задач, как анализ эффективности грузовых операций, оценка правильности выбора набора работающего оборудования и малоприспособна для решения оптимизационных задач по времени выполнения грузовых операций.

В настоящей статье приводится описание разработанной авторами комплексной системы оценки уровня квалификации операторов грузовых систем терминалов по обработке нефти и нефтепродуктов, которая включает экономическую оценку управляющих воздействий и оценку правильности загрузки технических средств терминала. Экономическая оценка позволяет определить затраты на выполнение операций и определить их изменение при разных режимах работы системы. Критерий экономической оценки эффективности работы трубопроводной сети по своим задачам близок к критерию выбора оптимального путевого расхода топлива, разработанного С.В. Камкиным [2]. Однако, наш критерий относится к трубопроводной сети и включает постоянные затраты на тонну перекачиваемого груза и динамические потери на трение по квадратичной зависимости. Суперпозиция двух кривых дает кривую с четко выраженным минимумом, положение которого зависит от ряда эксплуатационных факторов. Набор оборудования, находящегося в работе, будет формировать уступы на этой кривой, а характер

кривых будет меняться в зависимости от режимов их работы. Подобное поведение оборудования и сети будет формировать неоднозначные тренды прогнозов, что, по мнению авторов, будет особенно важно для малоподготовленного персонала.

На рис.2 представлены графики изменения затрат на транспортировку груза на учебном терминале с учетом выбранных тарифных планов.



**Рис.2. Зависимость эксплуатационных расходов на грузовые операции от их от производительности**

На графике по оси абсцисс представлена производительность грузовых операций, а по оси ординат — стоимость эксплуатационных расходов на их проведение. Показаны следующие зависимости:

- **кривая 1** выражает потери на трение при перекачке груза с установленной производительностью, которая корректируется с учетом эксплуатационных расходов судна на проведение грузовых операций и тарифных планов;
- **кривая 2** – зависимость эксплуатационных расходов терминала на проведение грузовых операций, отнесенная к тонне перекачиваемого груза (складывается из затрат на постоянно работающее оборудование, освещения и оплаты обслуживающему персоналу);
- **кривая 3** – полученная в результате сложения кривых 1 и 2 функция оптимального распределения расходов на проведение грузовых операций.

Таким образом, одной из задач оператора является обеспечение работы грузовых средств в районе оптимальной точки *P* (рис.2). Однако, следует отметить, что ни время, ни количество затраченных ресурсов не могут служить однозначным критерием оценки компетентности оператора терминала. Поэтому дополнительно применяется интегрированная оценка

правильности используемого режима работы, которая положена в основу методики оценки компетентности. Разработанная авторами методика функционирует следующим образом.

Через промежутки времени (10 секунд) с использующихся в количестве  $i$  грузовых насосов считываются параметры работы: давление нагнетания  $p_{н(i)}$ , давление всасывания  $p_{в(i)}$ , частота вращения  $n_i$ , подача  $Q_i$ , на основании которых вычисляются следующие величины.

1. Производительность насосной установки (НУ):

$$Q_{\Sigma} = \sum_1^i Q_i \quad (1)$$

2. Энергия давления жидкости на выходе из  $i$ -го насоса определяется из уравнения его гидравлической характеристики:

$$\frac{P_{нi}}{\rho g} = a_i Q_i^2 + b_i Q_i n_i + c_i n_i^2 + \frac{P_{вi}}{\rho g}, \quad (2)$$

3. Энергия давления жидкости в условной точке соединения трубопроводов (совместной точке)  $H_f$ . Определяется как наименьшая из величин, вычисленных по (2).
4. Приведенный коэффициент зависимости энергии давления в совместной точке от подачи насоса:

$$C_i = c_i n_i^2 + \frac{P_{вi}}{\rho g} \quad (3)$$

5. Максимально допустимая энергия давления жидкости в условной совместной точке  $H_{нy}^*$  определяется как наименьшая из величин  $C_i$ , рассчитанных в (3).
6. Коэффициент безопасности работы НУ:

$$\tilde{H} = \left( \frac{H_{нy}^* - H_f}{H_{нy}^*} \right) 100\% \quad (4)$$

7. Критическое давление всасывания  $i$ -го насоса:

$$P_{вкp(i)} = \Delta h_{дон(i)} \rho g - \frac{8Q_i^2 \rho}{\pi^2 d^4} + p_n \quad (5)$$

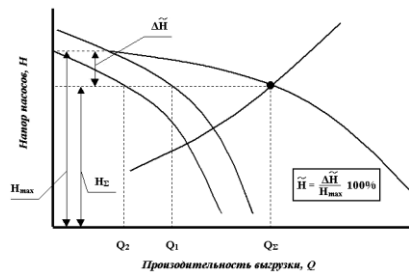
где  $p_n$  — давление насыщенных паров груза;

$\Delta h_{\text{доп}(i)}$  допустимый кавитационный запас (определяется по характеристике насоса).

8. Относительное превышение давления всасывания  $i$ -го насоса над критическим давлением:

$$\Delta p_{\text{в}(i)} = \left( \frac{P_{\text{Вкр}(i)} - P_{\text{в}i}}{P_{\text{в}i}} \right) 100\% \quad (6)$$

Производится анализ безопасности работы установки по полученным значениям. Работа НУ считается безопасной, если полученные в (5) и (6) значения  $\tilde{H}$  и  $\Delta p_{\text{в}(i)}$  составляют величину более 3 процентов. На рис.3 показано, что при низких значениях коэффициента безопасности один из работающих насосов может оказаться в аварийном режиме «запирания» (работа с нулевой подачей). Одновременно с этим необходимо выполнение условия  $\Delta p_{\text{в}(i)} > 3\%$ , которое обеспечивает бескавитационную работу грузовых насосов.



**Рис.3. Оценка безопасности работы НУ по коэффициенту безопасности**

Длительная эксплуатация оборудования на режимах, близких к аварийному, влияет на безопасность проведения грузовых операций в целом. Кроме того, такие режимы, как и режимы кавитационные, приводят к значительному износу оборудования. Именно поэтому продолжительная эксплуатация оборудования оператором с малыми значениями  $\tilde{H}$  и  $\Delta p_{\text{в}(i)}$  приводит к существенному снижению суммарной оценки его компетентности.

Целью следующего этапа расчетов является определение, насколько эффективный режим выбран оператором для выполнения перегрузочных работ. Для вычисления показателей эффективности работы НУ авторами разработан оригинальный алгоритм, который позволяет определить объемный и гидравлический КПД установки по параметрам расчетного (паспортного)

режима каждого насоса. КПД насосов на расчетном режиме вычисляются на основе известных уравнений [3] по его конструктивным показателям.

9. Теоретическую характеристику насоса опишем линейным уравнением

$$H_T = x \frac{n_i}{n_{\max}} Q_T + y \frac{n^2}{n_{\max}^2}. \text{ Тогда коэффициенты уравнения теоретической}$$

характеристики насоса определяются:

$$x = \frac{H_{T0} - H_T^{\max}}{Q_{T0}}; \quad y = H_T^{\max} \quad (7)$$

Поясним суть используемых в алгоритме уравнений с помощью графических построений (рис.4). В условиях эксплуатации грузовой насос может работать по любой из точек, лежащих на его характеристике  $H=f(Q)$ , при этом теоретические параметры его работы определяются одной из точек, лежащих на его теоретической характеристике  $H_T=f(Q_T)$ . При работе в точке  $A$  (рис.4) подача равна нулю, следовательно в насосе не происходит гидравлических потерь, обусловленных трением движущейся жидкости в насосе, и гидравлический КПД равен нулю, при этом  $\eta = \eta_o \eta_m$ . С другой стороны, при работе насоса в точке  $B$  с нулевым значением напора, в насосе не происходит объемных потерь, обусловленных перетеканием части жидкости на всасывание из-за разности давлений на входе и выходе жидкости из рабочего колеса, при этом  $\eta = \eta_r \eta_m$ . Следовательно, при работе насоса между указанными двумя крайними точками, соотношение гидравлических и объемных потерь может быть определено по отношению текущего напора насоса к максимальному (на рис.4 показано для точек  $C$  и  $D$ ). Это соотношение вычисляется в следующей последовательности.

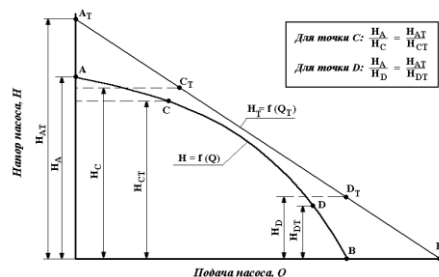


Рис.4. Определение КПД насоса по теоретическим и расчетным параметрам

10. Для каждого из насосов определяется относительное значение напора:

$$\theta_{Hi} = H_i / H_{\max(i)}, \text{ где } H_{\max(i)} = c_i \frac{n^2}{n_{\max}^2} \quad (8)$$

11. Теоретический напор  $i$ -го насоса при подаче  $Q_i$ :

$$H'_{Ti} = x \frac{n_i}{n_{\max}} Q_i + y \frac{n_i^2}{n_{\max}^2} \quad (9)$$

12. Теоретический напор  $i$ -го насоса:

$$H_{Ti} = H'_{Ti} - \theta_{Hi} (H'_{Ti} - H_i) \quad (10)$$

13. Теоретическая подача  $i$ -го насоса:

$$Q_{Ti} = \frac{\left( H_{Ti} - y \frac{n_i^2}{n_{\max}^2} \right)}{x \frac{n_i}{n_{\max}}} \quad (11)$$

14. Гидравлический и объемный КПД  $i$ -го насоса:

$$\eta_{Gi} = H_i / H_{Ti}; \eta_{oi} = Q_i / Q_{Ti} \quad (12)$$

15. КПД  $i$ -го насоса:

$$\eta_i = \eta_{Gi} \eta_{oi} \eta_{mi} \quad (13)$$

16. КПД насосной установки:

$$\eta_{ny} = \frac{H_f Q_{\Sigma}}{\sum_1^i \left( H_i Q_i / (\eta_{Gi} \eta_{oi} \eta_{mi}) \right)}, \quad (14)$$

На основании результатов расчета эффективности для каждого насоса, вычисляются показатели работы НУ в целом.

17. Полезная мощность насосной установки:

$$N_{ny} = \rho g H_f Q_{\Sigma} \quad (15)$$

18. Полный КПД  $i$ -го насоса

$$\eta_i = \eta_{Gi} \eta_{oi} \eta_{mi} \quad (16)$$

19. Мощность приводов НУ

$$N_{прив(i)} = \sum_1^i \left( \rho g H_i Q_i / \eta_i \right) \quad (17)$$

Выполняется проверка полученного режима на эффективность:

$$N_{npus-1(i)} < N_{npus(i)}. \quad (18)$$

Если условие (18) выполняется, по выражениям (4) и (5) анализируется безопасность режима работы НУ после вывода из работы одного из насосов. Если эти условия удовлетворяются, текущий режим работы грузовой системы, выбранный оператором признается неэффективным.

Аналогичным образом проверяется возможность повышения эффективности грузовых операций за счет увеличения числа работающих насосов, повышения энергии давления жидкости на входе в насос за счет подбора подключенных емкостей или изменения их количества, включения или выключения подхватывающего (бустерного) насоса и других мер. Расчет и анализ показателей полученных режимов выполняется аналогично первоначальному по формулам (2-17). Если с помощью описанного выше алгоритма удастся найти режим, обеспечивающий наименьшее энергопотребление ( $N_{npus(i)}^{\min}$ ), итоговая оценка компетентности оператора снижается.

Другим критерием, определяющим уровень квалификации обучаемого, является время проведения грузовых операций, определяемое по формуле:

$$\tau_i = T / Q_{\Sigma}, \quad (19)$$

где  $T$  – грузовместимость танкера.

Оптимальным временем грузовых операций является такое, когда все эксплуатационные расходы терминала на перекачку груза компенсируются оплатой судовладельца за стоянку танкера у терминала и определяется решением системы уравнений, графическое представление которой дано на рис.1:

$$\begin{cases} \tau_{opt} = \frac{K_{GO} + \Delta K}{N_{npus} \eta_{gen} b_{gen} k_{HFO} + G_{gas} b_{gas} k_{DO} + k_{pers}} \\ \tau_{opt} = \frac{K_{GO} + \Delta K_{don}}{k_{term}} \end{cases} \quad (20)$$

где  $\eta_{gen}$  КПД установленных на терминале дизель-генераторов;  
 $\tau_{opt}$  оптимальное время выполнения грузовых операций, ч;



$b_{gen}$	удельный расход топлива дизель-генераторов, кг/(кВт ч);
$k_{HFO}$	стоимость тяжелого топлива, у.е./кг;
$G_{gas}$	производительность СИГ терминала, м <sup>3</sup> /ч;
$b_{gas}$	удельный расход топлива газогенератора СИГ, кг/(м <sup>3</sup> ч);
$k_{DO}$	стоимость легкого топлива, у.е./кг;
$k_{pers}$	почасовая оплата персоналу терминала, у.е./ч;
$K_{ГО}$	себестоимость грузовых операций, у.е.;
$\Delta K$	чистая прибыль терминала за обработку танкера, у.е.;
$k_{term}$	оплата судовладельца за стоянку танкера у терминала, у.е.;
$\Delta K_{oon}$	плата судовладельца терминалу за оказание дополнительных услуг (бункеровка судна, прием пресной воды, прием снабжения, услуги связи и др.), у.е.

Таким образом, оператор должен выбрать производительность грузовых средств таким образом, чтобы общее время выполнения операций соответствовало оптимальному. В этом случае плата судовладельца за стоянку танкера полностью компенсирует эксплуатационные затраты терминала и принесет некоторую прибыль  $\Delta K$ . Если оператор выбрал завышенную производительность, терминал понесет неоправданные убытки, так как эксплуатационные расходы превысят полученные доходы. Если оператор занизил производительность, судовая администрация вправе заявить протест и терминал также понесет дополнительные расходы на оплату штрафов.

Таким образом, обобщенный критерий квалификации обучаемого рассчитывается с учетом трех составляющих: безопасности, продолжительности и эффективности грузовых операций:

$$\varpi_i = 0,4 \left( \frac{\tilde{H} - 3}{\tilde{H}} + \frac{\Delta p_{e(i)} - 3}{\Delta p_{e(i)}} \right) + 0,3 \frac{\tau_{opt}}{\tau_i + |\tau_{opt} - \tau_i|} + 0,3 \frac{N_{npus(i)}^{\min}}{N_{npus(i)}}, \text{ при этом } 0 \leq \varpi_i \leq 1, \quad (21)$$

По значениям  $\varpi_i$  в процессе выполнения упражнения выполняется построение «диаграммы компетентности», а по его завершении выставляется итоговая оценка, которая рассчитывается как среднее арифметическое

значений  $\omega_i$ , полученных в ходе упражнения и представляет собой значение между 0 и 1 (либо выраженное в процентах). Оценка менее 0,3 определяет низкую квалификацию, оценка более 0,7 – высокую. Средняя квалификация определяется значениями в интервале между 0,3 и 0,7. Расчет параметров повторяется по истечении задержки времени, длительность которой определяется динамикой изменения параметров работы механизмов [4].

Преимуществами разработанной авторами системы оценки компетентности персонала нефтяных терминалов над существующими являются:

- возможность выполнять как обучение слушателей без опыта работы на оборудовании терминала, так и проверку компетентности персонала, ответственного за грузовые операции;
- возможность проводить обучение операторов грузовых систем терминала методам эффективного проведения погрузки и выгрузки нефтеналивных судов;
- возможность решения задач по экспертной оценке эффективности грузовых операций.

### **Литература**

1. Казунин Д.В. Тренажер терминала для обработки нефтепродуктов. Руководство обучаемого. // СПб.: ЗАО «Транзас», 2004. – 47 с.
2. Возницкий И.В., Шмелев В.П., Камкин С.В. Эксплуатация судовых дизелей. // М: Транспорт, 1990. – 341 с.
3. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. // М.: Машиностроение, 1996.
4. Маценко С.В. «Исследование гидравлических характеристик грузовых насосов крупнотоннажных танкеров и их оптимизация» Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.05. // Новороссийск: НГМА, 2004. – 24 с.