УДК 622.692

Голубева Алина Константиновна, магистрант
Горошко Сергей Дмитриевич, магистрант
Коробейников Илья Алексеевич, магистрант
Автомонов Евгений Геннадьевич, доцент
(ДВФУ, г. Владивосток)
Абрецова Елена Сергеевна, магистрант
(КузГТУ, г. Кемерово)

Alina Konstantinovna Golubeva, undergraduate
Sergey Dmitrievich Goroshko, undergraduate
Ilya Alekseevich Korobeinikov, undergraduate
Evgeny Gennadyevich Avtomonov, Associate Professor
(FEFU, Vladivostok)
Elena Sergeevna Abretsova, undergraduate
(KuzSTU, Kemerovo)

ВЫЯВЛЕНИЕ МАЛЫХ УТЕЧЕК НЕФТИ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМА РАБОТЫ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

DETECTION OF SMALL OIL LEAKS DURING SIMULTANEOUS CHANGES IN PUMP OPERATING CONDITIONS

Аннотация: Исследовано выявление малых утечек при переключении насосов. На сосредоточенной модели сопоставлены блокировка тревог и компенсация переходного небаланса при ограниченных ошибках. Построена карта условий, в которых компенсация сокращает задержку обнаружения.

Abstract: Small-leak detection during pump switching is studied using a lumped-parameter model. Alarm blocking and transient-imbalance compensation are compared under bounded errors. An operating map identifies conditions in which compensation reduces detection delay.

Постановка задачи

После переключения насосов входной и выходной расходы нефти некоторое время различаются. Из-за изменения давления часть массы накапливается в трубопроводе или высвобождается из него. Поэтому система контроля может подать тревогу на герметичном участке. Временный запрет тревог позволяет переждать этот процесс, но повреждение, возникшее одновременно с переключением, также останется без сигнала до окончания паузы.

При обнаружении утечек учитывают состояние насосного оборудования и переходные изменения давления и расхода [1–3]. Точность контроля зависит от качества исходных данных и погрешностей измерений [4, 5]. В настоящей работе проверяется, при каких условиях компенсация переходного небаланса позволяет обнаружить утечку быстрее, чем временная блокировка тревог.

Цель работы – сравнить временную блокировку тревог и непрерывную компенсацию переходного небаланса при одинаковом ограничении ошибки измерений. На упрощенной модели построена карта, разделяющая области преимущества этих правил. Рассматривается совпадение начала утечки и изменения подачи; параметры действующего нефтепровода в исследовании не используются.

Модель совместного события

Рассматривается участок с установившимся исходным расходом. В начале наблюдения подача ступенчато изменяется, одновременно появляется утечка. Переходный процесс описывается сосредоточенной линейной моделью баланса массы. Переменная y – отклонение выходного массового расхода от установившегося значения, отнесенное к исходному массовому расходу:

$$T\,\frac{dy}{dt} + y = a - \lambda, \quad y(0) = 0, \tag{1}$$

В уравнении (1) принято, что изменение массы нефти в участке линейно связано с изменением выходного расхода. Постоянная времени T определяет, как быстро расход приближается к новому установившемуся значению. Переключение насоса задано ступенчатым изменением подачи, а расход утечки принят постоянным. Модель позволяет сравнить правила сигнализации по сглаженным расходам. Характеристика насоса и распространение волн давления в расчете не учитываются.

Небаланс $b(t)$ – разность входного и выходного массовых расходов, отнесенная к исходному расходу. Из решения уравнения (1) получаем:

$$b(t) = a \cdot exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \lambda \cdot \left[1 - exp\left(-\frac{t}{T}\right)\right], \tag{2}$$

Первое слагаемое в формуле (2) описывает небаланс от переключения насосов: со временем он затухает. Вклад утечки постепенно возрастает от нуля и приближается к λ. При снижении подачи первое слагаемое отрицательно и в начале переходного процесса может скрыть утечку. При повышении подачи положительный небаланс возможен даже на герметичном участке. На рисунке 1 показан случай снижения подачи.

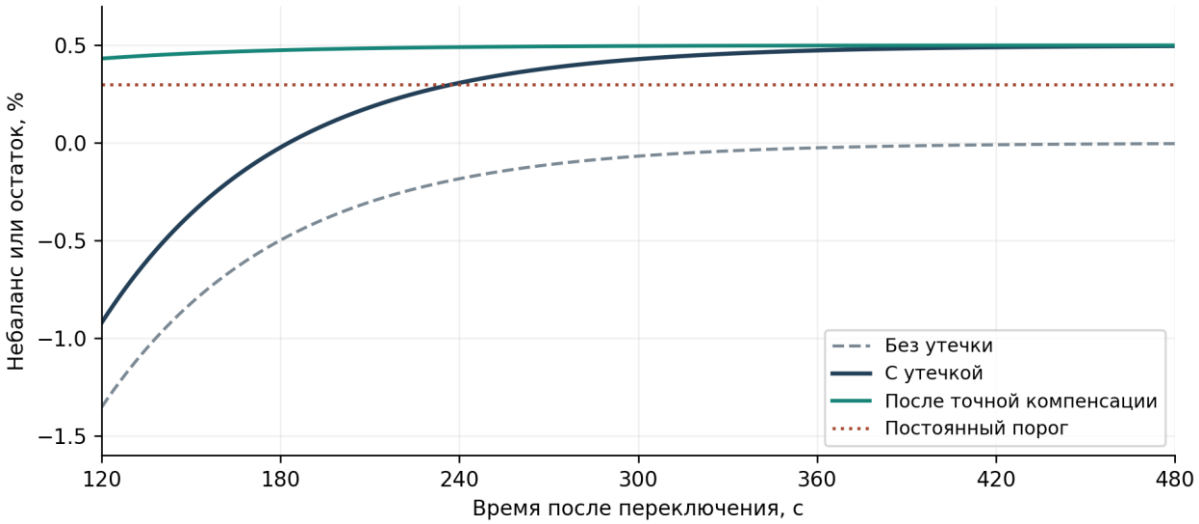

Рисунок 1 – Небаланс и остаток после точной компенсации при снижении подачи на 10% и утечке 0,5%.

В таблице 1 приведены параметры расчетного сценария. Для сравнения используется баланс массы: при различии плотностей на входе и выходе разность объемных расходов сама по себе еще не означает потерю нефти.

Таблица 1 – Условия расчетного сравнения

Величина	**Обозначение**	**Принятое значение**
Время после переключения	t	Шаг 1 с; наблюдение 1800 с
Изменение входной подачи	a	Повышение или снижение на 10 %
Расход утечки относительно исходного	λ	От 0,45 до 2,0 % для карты
Номинальная постоянная времени	τ	60 с
Фактическая постоянная времени	T	Симметричный интервал вокруг номинала
Неопределенность постоянной времени	–	От нуля до ±40 %
Постоянная часть порога	h	0,3 % исходного расхода
Предел ошибки измеренного небаланса	ε	±0,1 % исходного расхода
Подтверждение сигнала	–	10 последовательных отсчетов

К расчетному небалансу добавляется погрешность измерений. Предел ±0,1% исходного расхода относится к погрешности разности входного и выходного расходов в целом. Для построения карты использованы расходы утечки от 0,45 до 2,0% массового расхода.

Организация сравнения

При повышении подачи контроль по постоянному порогу может вызвать тревогу на герметичном участке. Для сравнения выбраны два правила, которые исключают такую тревогу при принятых пределах погрешности.

При временной блокировке тревога запрещена, пока штатный небаланс не снизится до допустимого уровня. При компенсации контроль продолжается с момента переключения. Из измеренного небаланса $b_{obs}(t)$ вычитают прогноз для герметичного участка, рассчитанный по номинальной постоянной времени τ:

$$r(t) = b_{obs}(t) - a \cdot exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

Остаток $r(t)$ зависит от расхода утечки, погрешности измерений и точности прогноза. Даже без утечки и погрешности остаток может быть ненулевым, если фактическая постоянная времени T отличается от номинальной τ. Через $E(t)$ обозначим наибольшее расхождение между фактическим и прогнозируемым штатным небалансом при допустимых значениях T:

$$E(t) = |a| \max_{T \in \{T_{min}, T_{max}\}} \left| exp\left(-\frac{t}{T}\right) - exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right|, \quad (4)$$

При фиксированном $t > 0$ функция $exp\left(-\frac{t}{T}\right)$ возрастает с T. Поэтому максимальное отклонение от номинального прогноза достигается на одной из двух границ интервала. На отдельном отсчете признак утечки возникает, если остаток превышает сумму постоянной уставки h и границы $E(t)$:

$$r(t) > h + E(t), \quad (5)$$

На герметичном участке остаток не превышает $E(t)$ плюс предельная погрешность измерений. Уставка составляет 0,3% исходного расхода, а предел погрешности – 0,1%. Поэтому при принятых условиях порог из формулы (5) не превышается. Параметры прогноза во время события фиксированы: подстройка по текущим данным могла бы включить начинающуюся утечку в описание штатного режима.

При блокировке для обоих направлений переключения применяется общая пауза. Она заканчивается в первый целый момент времени, когда максимальный штатный небаланс с учетом положительной ошибки измерений уже ниже уставки. Длительность рассчитывается заново для каждого интервала неопределенности. После паузы начинается подтверждение сигнала. Блокировка, отдельно оптимизированная для снижения подачи, в это сравнение не входит.

Во всех аварийных расчетах используется неблагоприятная ошибка измерения, уменьшающая наблюдаемый небаланс на допустимую величину. Для каждого правила определяется наибольшее время сигнала среди обоих направлений изменения подачи и всех допустимых постоянных времени. Это предельная задержка внутри модели, а не среднее время и не вероятность обнаружения. Постоянная предельная отрицательная ошибка дает нижнюю границу сигнала в каждый момент, поэтому оценка охватывает и произвольно меняющуюся во времени ошибку в тех же пределах.

Результаты и границы преимущества компенсации

Результаты для характерных условий приведены в таблице 2. При точном прогнозе переходного процесса компенсация существенно сокращает задержку. По мере расширения интервала неопределенности приходится увеличивать допустимую модельную границу, и преимущество уменьшается. Этот эффект особенно заметен при малом расходе утечки.

Таблица 2 – Предельное время сигнала с учетом ошибки измерений

Диапазон T, ± %	Утечка, %	Блокировка, с	Компенсация, с
5	0,5	303	239
5	1,0	256	95
5	2,0	256	36
20	0,5	345	360
20	1,0	291	208
20	2,0	291	119
40	0,5	400	446
40	1,0	338	283
40	2,0	338	188

Примечание. Расход утечки дан в процентах от исходного расхода. Время отсчитывается от начала совместного события и включает подтверждение. Приведен наихудший результат для обоих направлений переключения и всего заданного интервала постоянной времени.

При узком диапазоне неопределенности компенсация ускоряет обнаружение для всех показанных расходов утечки. По мере расширения диапазона этот выигрыш уменьшается. Для наименьшей из представленных утечек он сменяется запаздыванием, хотя при более крупной потере компенсация по-прежнему оказывается быстрее. Численные значения приведены в таблице 2; зависимость нельзя описать одним постоянным выигрышем во времени.

Карта на рисунке 2 построена для 5103 сочетаний расхода утечки и ширины интервала неопределенности. Для каждой точки сопоставлены предельные задержки при одинаковом ограничении измерительной ошибки. Цвет показывает разность задержек блокировки и компенсации. Черная линия разделяет области, где раньше подтверждается утечка: при компенсации или при контроле с блокировкой. Граница рассчитана для заданной

уставки, амплитуды изменения подачи и подтверждения по последовательным отсчетам.

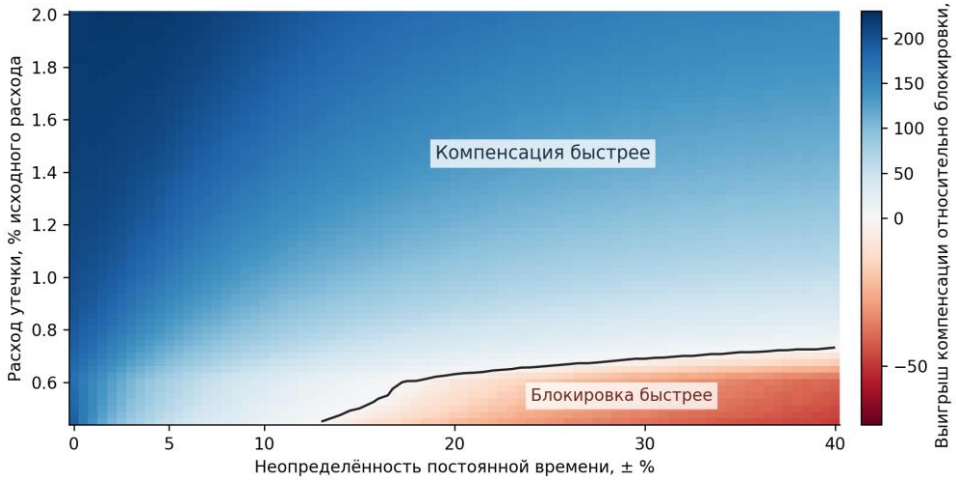

Рисунок 2 – Разность предельных задержек блокировки и компенсации, с

Чем шире интервал T, тем больше расхождение между штатным небалансом и прогнозом приходится допускать. При малой утечке остаток из-за этого дольше не превышает порог. В расчете менялась добавка $E(t)$, а постоянная уставка h оставалась прежней. Снижение h уменьшило бы запас по отношению к погрешности измерений.

При расходе утечки 0,4% исходного расхода предельная отрицательная погрешность 0,1% снижает установившийся измеренный небаланс до уставки 0,3%. Для тревоги требуется строгое превышение порога. При снижении подачи и точном прогнозе в этом случае ни одно из двух правил не дает сигнала. Поэтому при расходе утечки не более 0,4% исходного расхода обнаружение нельзя гарантировать для всех расчетных условий. Первый расход утечки на карте – 0,45%.

Проверка расчета и практическая интерпретация

При заданном направлении переключения и расходе утечки небаланс монотонно меняется с T. Остаток сохраняет эту зависимость, поскольку для всех значений T вычитается один и тот же номинальный прогноз. Порог компенсации и момент снятия блокировки рассчитываются для интервала целиком. Поэтому наиболее позднее подтверждение достаточно искать на его границах.

Для отдельных сочетаний параметров дополнительно проверены значения T внутри интервала. Аналитическое решение совпало с результатом точного дискретного расчета. В расчетах без утечки при предельной положительной погрешности оба правила не давали тревоги.

Чтобы применить карту к конкретному участку, сначала задают минимальный расход утечки, который требуется обнаружить. Затем по записям штатных переключений, не использованным при настройке модели, проверяют прогноз и определяют допустимый диапазон T. По этим двум величинам можно сопоставить задержки блокировки и компенсации.

Приведенные задержки рассчитаны для сосредоточенной модели. Для проверки на действующем нефтепроводе потребуются характеристики насосов и регуляторов, сведения о месте повреждения и зависимости расхода утечки от давления, а также данные о синхронизации и смещении показаний приборов. Момент переключения и амплитуда изменения подачи в расчете заданы точно. Если эти величины определяются с погрешностью, ее вклад нужно учесть в границе $E(t)$.

Выводы

Повышение подачи может вызвать положительный небаланс на герметичном участке, а снижение – временно скрыть утечку. Поэтому при проверке системы обнаружения следует отдельно рассматривать утечку, которая начинается одновременно с переключением насосов.

При расходе утечки 0,5% исходного расхода и неопределенности T ±5 % предельная задержка составила 239 с при компенсации и 303 с при блокировке. При расширении интервала до ±20% компенсация оказалась медленнее: 360 с против 345 с. Для утечек 1,0 и 2,0% компенсация давала более ранний сигнал даже при ±40%. Таким образом, выбор правила зависит от того, утечку какого расхода требуется обнаружить и насколько точно модель воспроизводит переходный процесс. Применимость полученной границы к действующему нефтепроводу предстоит проверить на распределенной гидравлической модели и независимых записях переключений.

Список литературы

1. Kang J., Zhang L., Liang W. Fault diagnosis of pipeline and pump unit systems using status coupling analysis // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2015. Vol. 33. P. 70–76. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.015.
2. Лурье М. В., Зверев Ф. С. Способ обнаружения утечек жидких углеводо-родов из магистральных трубопроводов: патент РФ № 2421657 C1. Заявл. 18.02.2010; опубл. 20.06.2011.
3. Malekpour A., She Y. Real-time leak detection in oil pipelines using an Inverse Transient Analysis model // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 70. Article 104411. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104411.
4. Lu Z., She Y., Loewen M. A Sensitivity Analysis of a Computer Model-Based Leak Detection System for Oil Pipelines // Energies. 2017. Vol. 10, no. 8. Article 1226. DOI: 10.3390/en10081226.
5. Wang L., Wang Q., Wang H., Xiong M., Jiao S., Sun X. A Leak Identification Method for Product Oil Pipelines Based on Flow Rate Balance: Principles and Applications // Processes. 2025. Vol. 13, no. 8. Article 2459. DOI: 10.3390/pr13082459.