

Д. А. Васильев, В. Т. Волков, Д. Б. Волков (Самара, СамГУПС). **Теплоперенос в устройствах прямого нагрева для нефтеналивных железнодорожных цистерн.**

Перевозка вязких нефтепродуктов в зимний период на большие расстояния приводит к повышению их вязкости и застыванию. Это, в свою очередь, вызывает необходимость предварительного разогрева перед сливом. Сроки, предоставляемые на слив, ограничены и варьируются в пределах 4–10 часов. Издержки, связанные с простоем вагонов при разгрузке, можно существенно сократить, если использовать на стадии выгрузки нагрев перевозимого продукта устройствами прямого нагрева (без промежуточных теплоносителей).

В настоящее время предложено множество способов и устройств нагрева, основывающихся на конвективном теплообмене (парообогревательные рубашки и теплообменные контуры) или индукционном нагреве (ТЭНы). Однако внедрение в технический процесс разгрузки таких разогревающих устройств связано с серьезными экономическими затратами и часто наносит вред окружающей среде. Другим путем решения проблемы является разогрев перевозимого материала в пути. Однако недостатками данного подхода являются увеличенная материалоемкость и меньший полезный объем цистерны, а также необходимость переоборудования всего парка цистерн.

Принцип действия устройств прямого нагрева основан на межмолекулярном трении разогреваемого материала. Иными словами, разогрев осуществляется за счет прямого преобразования механической энергии перемещения во внутреннюю энергию продукта. Предлагаемое нами устройство разогрева имеет простую конструкцию и состоит из электродвигателя и соединенного с ним вала, с другой стороны которого закреплены лопасти для перемешивания. Электродвигатель закреплен на каретке, вертикально перемещающейся во внутренней раме корпуса посредством подъемного механизма. Внутренняя рама телескопически соединена с внешней рамой, закрепленной на подъемном механизме. Такая конструкция позволяет использовать устройства на железнодорожных цистернах различных габаритов и конструкций. Кроме того, нижняя часть внутренней рамы корпуса оборудована замком, который позволяет фиксировать устройство на горловине цистерны в независимости от ее диаметра.

Для проверки эффективности работы устройства прямого нагрева воспользуемся математической моделью, разработанной нами для теплогенератора. В целом, во всех экспериментах нагрев исследуемых нефтепродуктов с достаточной точностью (5%) описывается уравнением:

$$T(t) = T_0 + \frac{Q_{\text{ист}}}{kS} \left(1 - \exp \left(- \frac{kSt}{c_v m} \right) \right), \quad k = S \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} \right)^{-1} \frac{1}{c_v m},$$

где T_0 — начальная температура масла, Q — мощность двигателя, k — коэффициент теплопередачи, S — площадь теплообмена, α — коэффициент теплоотдачи, λ — теплопроводность, δ — толщина стенки сосуда.

Создана модель такого нагревательного устройства и проведен ряд экспериментов. В экспериментах используются: электрический двигатель мощностью 125 Вт, две емкости объемом 300 мл и 500 мл, прибор регистрации температуры Center 314 с термпарой ТР-К01 (диапазон измерения температуры от -50°C до 200°C , погрешность измерений $\pm 0,75\%$).

Емкость объемом 300 мл закреплена внутри емкости 500 мл с помощью пенопластовых шин. Внешняя емкость заполнена маслом, таким образом, обеспечивается масляная изоляция внутреннего сосуда от термического воздействия внешней среды. Сосуд с меньшим объемом является рабочим и содержит 300 г нагреваемого масла. Вал двигателя оснащен перемешивающим механизмом, выполненным в виде шнека.

В ходе экспериментов перемешивающий механизм опускается в рабочий сосуд и

приводится в движение электрическим двигателем. Перемещение слоев масла создает межмолекулярное трение, а следовательно и нагрев масла.

Потребность в такого рода нагревательных устройствах в основном возникает в зимний период, поэтому первые эксперименты проводились на охлажденном масле. Рабочая емкость, закрепленная в теплоизолирующей емкости, заполнена маслом охлажденным до $-25,5^{\circ}\text{C}$ (масляная изоляция имеет такую же температуру). Температура окружающей среды $22,8^{\circ}\text{C}$. Первый эксперимент проводится с использованием устройства нагрева, второй без него. В обоих случаях начальная температура масла составляет $-25,5^{\circ}\text{C}$, а продолжительность нагрева — 550 сек. Сравнив эти графики, можно наглядно оценить эффективность устройства прямого нагрева. Из проведенных экспериментов видно, что наибольшая разница между первым и вторым экспериментом наблюдается в первые 5 минут нагрева. Таким образом, можно предположить, что использование прямого нагрева наиболее эффективно в первые минуты нагрева. Учитывая механизм прямого нагрева, справедливо будет полагать, что такая эффективность нагрева обеспечивается высокой плотностью масла.

Для проверки правильности нашего предположения проведено несколько экспериментов по нагреву масла при комнатной температуре. Эксперименты показали, что с ростом температуры нагреваемого масла резко уменьшается эффективность прямого нагрева. В одном из случаев (начальная температура 21°C) удалось нагреть масло на 1 градус, то в следующем эксперименте (начальная температура $22,4^{\circ}\text{C}$) нагрев составил всего 0,4 градуса, при том что разница их начальных температур была 1,4 градуса. Такое снижение эффективности нагрева можно объяснить снижением плотности масла при повышении его температуры. При снижении плотности межмолекулярное трение уменьшается, что влечет за собой снижение эффективности такого вида нагрева.

Еще одним доводом в пользу высказанного предположения может послужить сравнение КПД устройства нагрева в проведенных экспериментах. Полезным является количество теплоты, переданное маслу: $Q = cm\Delta T/t$. По результатам подсчета КПД выяснилось, что для первого эксперимента КПД составил 5,78% (отрицательная начальная температура), а для последующих — КПД всего порядка 0,32% (начальная температура выше 20°C). Учитывая низкий КПД, было принято решение в последующих экспериментах использовать модифицированный перемешивающий механизм, представляющий собой пластину, закрепленную на оси шнека. Подобная модификация обеспечивает передвижение большего объема масла в сравнении с первым типом перемешивающего устройства, который использовался в ранних экспериментах. Кроме того, масляная изоляция емкости с нагреваемым маслом убрана, так как начальная температура масла равна температуре окружающей среды. По результатам нагрева можно судить о повышении эффективности при использовании модифицированного перемешивающего механизма. КПД устройства в последнем эксперименте составил 1,22%. Такое изменение устройства позволяет повысить эффективность передачи энергии при прямом нагреве, однако в целом эффективность нагрева обуславливается плотностью нагреваемого вещества.

Проведенные эксперименты показали эффективность нагрева вязких материалов устройством прямого нагрева. Это дает возможность полагать целесообразным использование таких установок на этапе выгрузки нефтепродуктов. Такие устройства нагрева позволят сократить издержки, связанные с простоем цистерн при застывании нефтепродуктов и не требуют переоборудования парка цистерн.