

УДК 532.5

## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ БИТУМА

**Р. З. Касимов<sup>1</sup>, А. А. Лебедева<sup>2</sup>, Д. Н. Попов<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

<sup>1</sup> te@istu.ru

**Аннотация.** В работе представлена методика численного моделирования процесса разогрева битума с переводом его в характерное жидкое состояние, когда наблюдаются конвективные потоки среды. Математическая модель процесса сформулирована на основе двухфазной задачи Стефана с привлечением уравнений, определяющих свободное движение частиц в расплаве. Приведены результаты расчетов и выводы.

**Ключевые слова:** установки для размягчения битума, задача Стефана, межфазная граница, математическое моделирование

## ON ONE APPROACH TO THE CALCULATION OF THE BITUMEN MELTING PROCESS

**R. Z. Kasimov<sup>1</sup>, A. A. Lebedeva<sup>2</sup>, D. N. Popov<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

<sup>1</sup> te@istu.ru

**Abstract.** The paper presents a technique for numerical modeling of the process of heating bitumen with its transfer to a characteristic liquid state, when convective flows of the medium are observed. The mathematical model of the process is formulated on the basis of the two-phase Stefan problem with the use of equations that determine the free motion of particles in the melt. The calculation results and conclusions are presented.

**Keywords:** installations for softening bitumen, Stephan's problem, interface, mathematical modeling

**Н**есмотря на то что битум относится к аморфным материалам, общепринято называть установки для подогрева и размягчения битума

битумоплавильными [1; 2]. В настоящее время такие установки имеют различные конструкции, модификации и оснащаются разнообразными техническими средствами: горелками, теплообменниками, мешалками и др. Интенсивность протекания процессов и энергоэффективность здесь зависят от ряда факторов, основными из которых являются:

- 1) производительность и, соответственно, объем рабочей емкости;
- 2) расположение в объеме нагревательных элементов или иных поверхностей теплообмена;
- 3) степень влияния внешних условий, особенно температуры наружного воздуха в холодный период времени года.

Широкое распространение получили плавильные установки с косвенным нагревом, нижним расположением теплообменника и боковой подачей битума, обладающие высокой надежностью.

Для моделирования процессов теплообмена, сопровождающихся фазовыми переходами, повсеместно используется методология задачи Стефана [3]. Ее суть заключается в том, что расчетная область в определенный момент времени может содержать объемы, заполненные твердым веществом и жидкостью (расплавом) и претерпевающие тепловые воздействия. Межфазная граница здесь изменяет свое положение под воздействием тепловых потоков и конвективных течений в расплаве.

Математическая модель, представленная системой дифференциальных соотношений, записанных в полярных координатах  $(\Theta, r)$ , включает в себя:

- 1) уравнение теплопроводности для твердой фазы;
- 2) уравнение теплопроводности для жидкой фазы;
- 3) уравнение переноса завихренности в области расплава;
- 4) уравнение Пуассона для функции тока в области расплава;
- 5) уравнения для проекций скоростей в области расплава.

Система уравнений дополняется начальными и граничными условиями, среди которых особого внимания заслуживают условия на межфазной поверхности  $S$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} [T] = 0 \text{ или } T_1 = T_2 = T^* \\ \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right] = Q_{\Phi} \bar{\rho} V_n \text{ или } \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = Q_{\Phi} \bar{\rho} V_n \end{array} \right.,$$

где  $Q_{\Phi}$  — теплота фазового перехода;  $\bar{\rho}$  — осредненная плотность двухфазной системы;  $V_n$  — скорость движения межфазной границы по нормали к ней.

Результаты расчетов представлены на рис. 1.

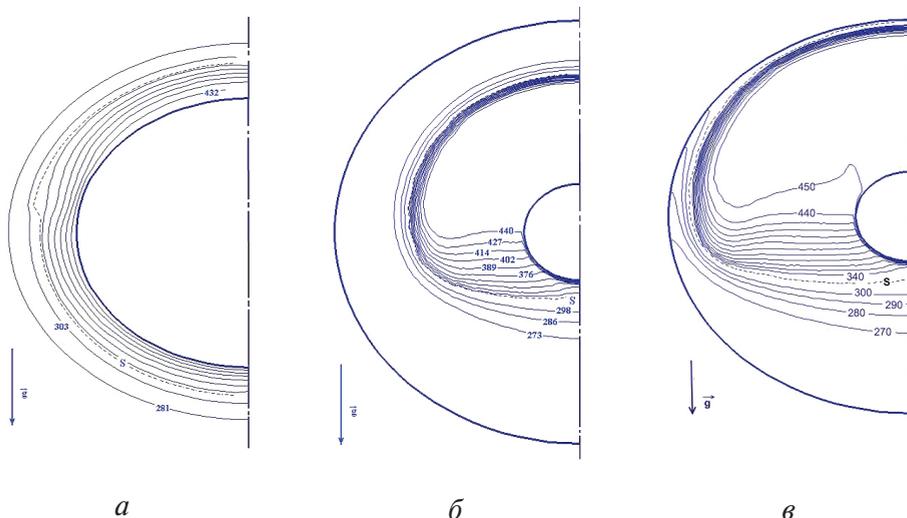


Рис. 1. Распределение температур и положение межфазной границы (штриховая линия) в моменты времени:  
 $a - \tau = 130$  с;  $b - \tau = 1000$  с;  $v - \tau = 2200$  с

На начальном этапе изотермы и линия  $S$ , представляющая собой образующую межфазной поверхности, имеют вид концентрических окружностей. Толщина области расплава незначительна и, таким образом, не способствует развитию конвективных течений. В определенный момент времени происходит отрыв потока от поверхности трубы на уровне  $\Theta = \pi$  и деформация изотерм и межфазной поверхности (рис. 1,  $a$ ).

Область расплава, показанная на рис. 1,  $b$ , вполне достаточна для эволюции конвективных течений и вихреобразования. Частицы жидкости, поднимаясь от верха трубы, попадают в холодную зону у межфазной границы, приобретают более низкую температуру и опускаются, подходя к нижней половине трубы.

Развитие процесса во времени интенсифицирует теплообмен и приводит к повышению скорости жидких частиц. На рис. 1,  $v$  продемонстрирована последняя из возможных картин теплообмена, поскольку поверхность  $S$  достигла внешней границы расчетной области и возникает необходимость замены граничных условий для параметров жидкой фазы.

Ортогональные сетки представлены на рис. 2.

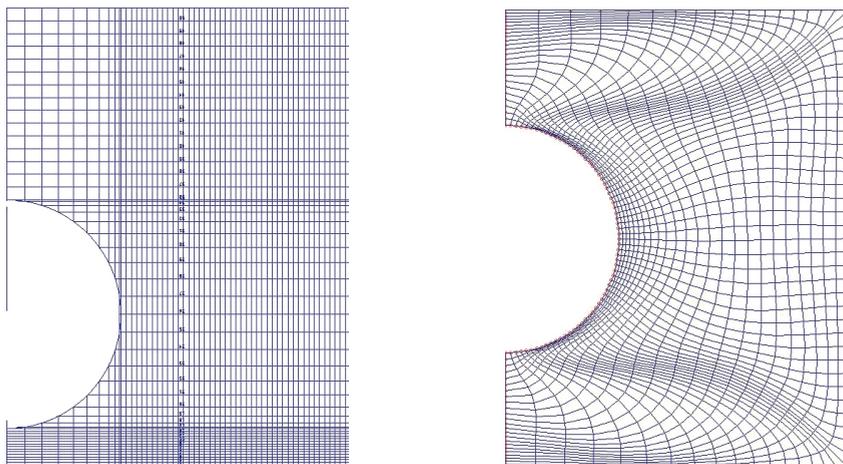


Рис. 2. Возможные варианты сеточных областей для расчета процессов плавления

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- 1) разработана и численно реализована математическая модель плавления битумных вяжущих в форме двухфазной задачи Стефана, дополненной блоком расчета свободной конвекции в области жидкой фазы с переменной вязкостью;
- 2) подход к реализации граничных условий на межфазной границе, предложенный Д. Н. Поповым, В. Н. Диденко и Р. З. Касимовым [4], в очередной раз показал свою эффективность;
- 3) используемая в модели полярная система координат имеет определенные ограничения, в частности, касающиеся допустимого расположения внешней границы расчетной области. Имеются необходимые предпосылки для использования в дальнейших исследованиях ортогональных сеток, представленных на рис. 2.

#### Список источников

1. Гун Р. Б. Нефтяные битумы. М. : Химия, 1973. 432 с.
2. Голдина В. Д. Серобитумные вяжущие. Омск : СибАДИ, 2011. 124 с.
3. Самарский А. А., Вабишевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М. : URSS, 2003. 784 с.
4. Попов Д. Н., Диденко В. Н., Касимов Р. З. Методика численного моделирования фазовых переходов теплоаккумулирующих материалов, заключенных в двумерный объем // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1 (25). С. 26–30.