

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 532.685

DOI: 10.17223/00213411/68/6/1

Акселерационные эффекты в диссипативных течениях

А.И. Филиппов¹, М.А. Зеленова¹¹Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, г. Стерлитамак, Россия

На основе сопоставления полученного нестационарного уравнения для скоростей фильтрации с классическим законом Дарси найдена зависимость диссипативной силы от вязкости фильтрующейся жидкости и проницаемости пористой среды, а также установлена взаимосвязь главной компоненты тензора диссипативной силы с этими величинами. Показано, что вклад акселерационной составляющей градиента давления при радиальном течении пропорционален квадрату скорости фильтрации и не зависит от проницаемости. Получено уточненное выражение для закона Дарси при радиальной фильтрации в сильно диссипативной среде с учетом акселерационной составляющей. Установлено, что при малых градиентах давления уточненный закон Дарси согласуется с его классическим выражением.

Ключевые слова: фильтрация, диссипативные силы, закон Дарси, уравнение Эйлера – Жуковского.

Введение

Исследование течений в сильно диссипативных системах [1] представляет практический интерес в связи с приложениями в нефтедобыче, гидрогеологии [2, 3], а также в прикладной аэродинамике [4]. Знаменательным событием в истории развития этого направления явились экспериментальные исследования инженера-гидравлика Анри Дарси [5], в результате которых ему удалось сформулировать основной закон, связывающий скорость фильтрации и градиент давления при одномерном диссипативном течении по трубе. Отметим, что открытие этого закона сопровождалось огромными научными дискуссиями [6], итогом которых явились обобщающие работы М. Маскета [7, 8] и др., позволившие уточнить многие физические закономерности, привести закон к современной формулировке и определить основные направления его использования в подземной гидродинамике и теории нефтегазодобычи.

При диссипативных течениях важную роль играют силы, которые приводят к превращению механической энергии в тепловую [1]. Эти силы являются преобладающими и их анализ очень важен для уточнения физических закономерностей диссипативных течений. Важным примером сильно диссипативных течений является фильтрация нефти и газа в природных коллекторах. Между тем даже в современных работах ведущих научных центров России не ставится вопрос об их оценке и влиянии на процессы течения [9, 10]. Более того, в работе [10] постулируется сопоставление закона фильтрации Дарси с уравнением Навье – Стокса в предположении, что вязкость фильтрующейся среды пренебрежимо мала.

В данной статье предпринята попытка построения выражения для диссипативных сил, которое позволило бы создать новые подходы к исследованию процесса фильтрации. В результате использования данного подхода удалось также установить закономерности влияния инерционных сил, вызванных пространственными компонентами градиента скорости.

Теория

Согласно основному фундаментальному закону классической гидродинамики, поле ускорения в текущей жидкости определяется градиентом давления, внешними массовыми полями $\mathbf{g} = \mathbf{g}(\mathbf{r}, t)$ (чаще всего гравитационное поле $\mathbf{g} = \text{const}$) и диссипативными силами

$$\frac{d\mathbf{w}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}P + \mathbf{g} + \mathbf{R}. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{w} = \mathbf{w}(\mathbf{r}, t)$ – поле скорости в объеме жидкости; $P = P(\mathbf{r}, t)$ – поле давления; $\rho = \rho(\mathbf{r}, t)$ – плотность жидкости; $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\mathbf{r}, t)$ – диссипативная сила, отнесенная к единице массы. Предполага-